

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Bioplyn a jeho využití v kogeneraci
Biogas and its utilization in co-generation

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal. Také bych zde rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Petru Moldříkovi Ph.D. za cenné rady a připomínky. Nakonec bych rád poděkoval všem, kteří mě podporovali během mých studií.

Děkuji.

Abstrakt

Cílem této práce je seznámit čtenáře s pojmem bioplyn a jeho využitím v kogeneraci. V úvodu práce se zabývám tím, co je to vlastně bioplyn, jaké má složení. Také je zde uveden popis procesu vzniku bioplynu a různé vlivy, které při něm působí. Pokračuji různými surovinami pro vznik bioplynu a nejdůležitějším se okrajově věnuji. Následují různé technologické postupy jeho získávání, které jsou nakonec vzájemně porovnávány. Poté je zde rozebrán problém kogenerace a to včetně různých zařízení využívající jako zdroj energie právě bioplyn. Na závěr je zde návrh kogenerační jednotky pro konkrétní zdroj bioplynu, který je v tomto případě skládka tuhého komunálního odpadu. Ve vlastním návrhu jsou zde zahrnuty jednotlivé parametry produkovaného bioplynu, důležité parametry vybrané kogenerační jednotky a také v finanční zhodnocení jejího provozu.

Klíčová slova

Bioplyn, biomasa, anaerobní technologie, kogenerace, kogenerační jednotka

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to introduce term biogas and its utilization in co-generation to the general public. At the beginning of my work I deal with term biogas – what it is, from which substances is biogas consist of. I also described process of formation biogas and influences during this process. I carry on with different raw materials for biogas and I take care of the most important of them. I continue with different technological procedures for formation of biogas and its acquisition, which I compared. I also analyzed problem of co-generation and different equipments using biogas as energy source. At the end I have draft of co-generation unit for real biogas source, in this case dump of municipal solid waste. In my own draft I included individual parameters of producing biogas, important parameters of selected co-generation unit and also financial evaluation of its operation.

Key words

Biomass, biomass, anaerobi technology, co-generation, co-generation unit

Seznam použitých symbolů a zkratek

ΔG°	rozdíl standardní Gibsovy energie
AD	anaerobní digesce
BP	bioplyn
BPS	bioplynová stanice
BRKO	biologicky rozložitelný komunální odpad
BRO	biologicky rozložitelný odpad
C/N	poměr uhlíku a dusíku
ČOV	čistička odpadních vod
KJ	kogenerační jednotka
KVET	kombinovaná výroba elektřiny a tepla
NT	nízkotlaká
TKO	tuhý komunální odpad
VT	vysokotlaká
CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
CH ₄	metan
C ₆ H ₁₂ O ₆	glukosa
H ₂	vodík
H ₂ O	voda
H ₂ S	sirovodík
N ₂	dusík
NO _x	oxidy dusíku
NO	oxid dusnatý
NO ₂	oxid dusičitý
NH ₃	čpavek

Obsah

1	Úvod	1
2	Ekologický význam	2
2.1	Aplikovaná ekologie v ČR	2
2.2	Anaerobní digesce	2
2.3	Ekologické přínosy anaerobní biometanizace	2
3	Bioplyn	3
3.1	Chemické složení bioplynu	3
3.1.1	Metan	3
3.1.2	Oxid uhličitý	4
3.2	Tvorba bioplynu	4
3.2.1	Reakce	4
3.2.2	Vliv teploty na tvorbu metanu	5
3.2.3	Vliv pH na tvorbu metanu	5
3.2.4	Využití bioplynu	6
3.3	Výhody a nevýhody anaerobních procesů	7
3.4	Suroviny pro tvorbu bioplynu	7
3.4.1	Biomasa	7
3.4.2	Odpady	8
3.4.3	Typy odpadů	8
3.4.4	Odpadní vody	9
4	Anaerobní technologie	11
4.1	Technologie získávání skládkového plynu	12
4.2	Technologie mokré fermentace	13
4.3	Technologie suché fermentace	16
4.4	Srovnání technologií	17
5	Kogenerace	19
5.1	Kogenerace s parními turbínami a motory	19
5.2	Kogenerace se spalovacími turbínami	23
5.3	Paroplynová zařízení	27
5.4	Speciální kogenerační zařízení	28
5.5	Kogenerace se spalovacími motory	30
6	Návrh KJ pro konkrétní zdroj bioplynu	35
6.1	Skládka TKO jako zdroj bioplynu	35
6.2	Vlastní návrh KJ – technické řešení	36
6.3	Vlastní návrh KJ – ekonomické zhodnocení	38
7	Závěr	40
	Seznam použité literatury	41

1 Úvod

Rozvoj lidské populace a hospodářský růst především ve vyspělých zemích s sebou nese za následek porušení rovnováhy celé řady celoplanetárních systémů. Lidská civilizace svou neustálou rozpínavostí a agresivitou ovlivňuje ovzduší, klima, půdu, vodu, koloběh látek, ostatní živé organismy, a dokonce i sama sebe. Na Zemi dnes už jen stěží nalezneme místo, kterého by se nedotkla lidská činnost. I v hloubkách oceánů, v kosmickém prostoru okolo planety i v nedostupných polárních oblastech se nacházejí stopy cizorodých látek a produktů, které by se na tato místa nikdy nedostaly bez přičinění člověka. Problémy poškození prostředí se díky lidské činnosti postupně stále více „globalizují“. Jedním z dnes nejdiskutovanějších problémů je globální oteplování planety. Problém spojený s globálním oteplováním (spolu s ostatními doprovodnými jevy také označovaný jako globální klimatická změna – global climate change) souvisí s principem tzv. skleníkového efektu, který slouží jako ochrana povrchu naší planety před drastickými změnami teploty mezi dnem a nocí. Plyny schopné tepelné (infračervené) záření pohlcovat, se nazývají skleníkové plyny. Patří mezi ně především vodní pára, oxid uhličitý, metan, ozon a oxid dusný. Koncentrace těchto plynů v atmosféře však od poloviny 19. st. roste exponenciálně, což vede ke globálnímu zvyšování teploty. Na zvýšení koncentrací těchto plynů se značnou měrou podepisuje spalování fosilních paliv. Česká republika se jako člen Evropské unie zavázala k předpisům, které členskými státy v následujících letech striktně předepisují minimální produkci energie z obnovitelných zdrojů. Jedním z těchto velmi perspektivních obnovitelných zdrojů energie je bioplyn.

2 Ekologický význam

2.1 Aplikovaná ekologie v ČR

V současnosti jsou asi nejdiskutovanějšími oblastmi aplikované ekologie v České republice energetika a nakládání s odpady. Ve světové energetice se zvyšuje rok od roku zájem o různé obnovitelné zdroje energií, což je zejména důsledkem snižujících se zásob fosilních paliv, nutnosti omezit produkci skleníkových plynů a zvyšující se nedůvěrou veřejnosti k jaderným elektrárnám. Zároveň v odpadovém hospodářství začíná intenzivní rozvoj recyklace namísto ukládání odpadů na skládku. Sloučením těchto dvou trendů došlo k využívání odpadů jako energetického zdroje. K tomu jsou vhodné zejména organické odpady (průmyslové, zemědělské i komunální).

Metody jejich využívání jsou v podstatě dvě:

- termická (spalování, zplynování, zkapalňování apod.)
- fermentační (především anaerobní digesce během níž je produkován bioplyn, ale např. i kvasná výroba etanolu).

Prakticky se v současné době využívá téměř výhradně spalování a výroba bioplynu. O tom, jaký se použije proces, zda termický či fermentační, rozhodují vlastnosti substrátu – jeho vlhkost a poměr C/N. Materiály s vlhkostí nad 45 % a s C/N pod 30/1 jsou vhodné pro anaerobní digesti (AD), zatímco pro spalování je lepší co možná nejnižší vlhkost a obsah N. Např. u zemědělských odpadů je sláma vhodná pro spalování a exkrementy hospodářských zvířat pro AD.

2.2 Anaerobní digesce

Anaerobní digesce je biochemický proces, jenž se skládá z celé řady posloupných fyzikálních, fyzikálně chemických a biologických procesů. Jedná se o přeměnu organických látek (biomasy) v anaerobních podmínkách na bioplyn a zbytkový fermentovaný materiál. Pro zjednodušení můžeme rovnici zapsat následovně: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3 CH_4 + 3 CO_2$

Proces probíhá při různých teplotách v rozmezí od 0 °C do 70 °C a podle meziproduktů jej lze rozdělit do čtyřech základních fází – hydrolýzu, acidogenezi, acetogenezi a metanogenezi.

2.3 Ekologické přínosy anaerobní biometanizace

Jednou z hlavních předností tvorby bioplynu anaerobní biometanizací je obnovitelnost zdroje energie, na rozdíl od ubývajících fosilních paliv. Z hlediska produkce skleníkových plynů, především CO_2 se považuje biomasa za neutrální, jelikož uvolněné množství je úměrné spotřebě při fotosyntéze v průběhu růstu biomasy. Biomasa je v jistém slova smyslu odpadní látkou, tudíž je její využití pro anaerobní biometanizaci úlevou odpadovému hospodářství. Pěstování biomasy přispívá k ochraně životního prostředí a zachování zemědělské půdy, která by byla jinak zdevastována průmyslovou a důlní činností. Další výhodou je nízký obsah síry.

3 Bioplyn

3.1 Chemické složení bioplynu

Bioplyn je svým chemickým složením jednoduchou i složitou látkou současně. Jednoduché je vždy majoritní složení bioplynu, tedy zastoupení složek v jednotkách objemových procent a výše. Reaktorové bioplyny jsou zpravidla prakticky tvořeny pouze směsí metanu a oxidu uhličitého v různých poměrech, záviselých na podmínkách biometanizace a na kvalitě substrátu. Velmi komplikované je ale složení stopových příměsí v bioplynech. Ve stopových složkách je zřetelná diference mezi bioplyny reaktorovými a skládkovými. Obvykle se do majoritních složek bioplynů zahrnují ještě další anorganické plyny přítomné v malých obsazích v desetinách objemového procenta (dusík, kyslík, vodík, čpavek, sulfan, vodní pára). Poměrné zastoupení obou hlavních složek bioplynu CH_4 a CO_2 můžeme v literatuře nalézt jako značně proměnné dle vstupního substrátu v širokém rozsahu zjištěných obsahů metanu od 50 % do 85 % obj.. Různé prameny se obecně shodují pouze v tom, že proteiny a lipidy poskytují vyšší výtěžky a vyšší koncentrace CH_4 oproti polysacharidům. Určení přesné hranice obsahů metanu a oxidu uhličitého v bioplynu podle použitého substrátu je značně nereálné, neboť proces ovlivňuje i množství dalších parametrů. Jedná se především o skladbu a stav přizpůsobení bakteriálních kultur a dále teplotu, pH, typ použitého reaktoru, zatížení daného reaktoru a další podobné vlivy. Nejen na těchto parametrech závisí poměrné zastoupení CH_4 a CO_2 v bioplynu, ale i celkový měrný výtěžek na hmotnostní jednotku zpracovaného substrátu. Ve srovnání minoritních složek s majoritními, je skladba minoritních látek bioplynu velmi pestrá. Do současné doby byla v reaktorových a skládkových bioplynech zjištěna přítomnost stovek a možná až tisíců minoritních složek. Počet spolehlivě a opakovaně identifikovaných složek lze dnes odhadovat na 400 – 500, jejich koncentrace se pohybuje na úrovni stovek $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ a méně. Minoritní složky, které se vyskytují ve fermentačních plynech můžeme rozdělit na látky pocházející z rozkladů přírodních materiálů a na látky pocházející z materiálů uměle vyrobených. O původu mnoha chemických jedinců, která se v bioplynu vyskytují ve stopovém množství je často velmi obtížné rozhodnout, protože se často jedná o již několikanásobně přeměněné látky. [1]

3.1.1 Metan

Metan je za běžné teploty a tlaku bezbarvý plyn bez zápachu. Na trhu se však vyskytuje s přísadami sirných sloučenin, aby se dal detekovat jeho případný únik. Jedná se o nejjednodušší uhlovodík. Je velmi hořlavý, a proto se využívá jako palivo v průmyslu. Není jedovatý a riziko práce s metanem spočívá hlavně v jeho hořlavosti. Se vzduchem v určitém poměru vytváří výbušné směsi. Hlavním zdrojem metanu je těžba zemního plynu, sopečná činnost a anaerobní rozklad organické hmoty (v trávicím traktu dobytka, fermentací odpadů).

3.1.2 Oxid uhličitý

Oxid uhličitý je velmi těžký bezbarvý plyn bez zápachu. V jeho pevném skupenství se nazývá jako suchý led. Jeho hustota při 25 °C činí 1,98 kg/m³. Molekula oxidu uhličitého obsahuje dvě dvojné vazby a je lineární. Při kontaktu se sliznicemi je dráždí a má nakyslou chuť. Atmosférický oxid uhličitý pochází z různých značně rozmanitých zdrojů. Z přirozených zdrojů je to sopečná činnost, dýchání aerobních organismů, ale také fermentace. Z umělých zdrojů vzniká především spalováním organických látek, výrobou elektrické energie z fosilních paliv a používáním dopravních prostředků.

3.2 Tvorba bioplynu

Bioplyn je produkován zejména v přirozených prostředích, jako jsou bažiny, sedimenty, trávicí trakty dobytka, v zemědělství potom na rýžových polích a oblastech uskladnění hnoje a kejdy, a v odpadovém hospodářství na skládkách, v čističkách odpadních vod nebo v bioplynových stanicích. Rozklad organických látek na bioplyn vyžaduje koordinovanou metabolickou součinnost několika druhů anaerobních mikroorganismů, při které je produkt jedné skupiny mikroorganismů substrátem skupiny druhé.

Při řízené fermentaci v bioreaktoru je nutno zajistit vhodné fyziologické podmínky pro jejich správnou činnost. Mezi nejdůležitější podmínky patří:

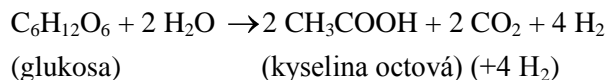
- anaerobní prostředí
- složení substrátu
- teplota (35-42 °C v mezofilní oblasti, nebo 52-60 °C v termofilní oblasti)
- míchání
- živiny
- pH 6,5-7,5

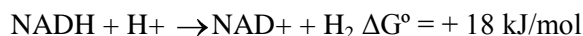
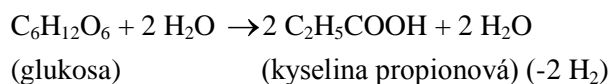
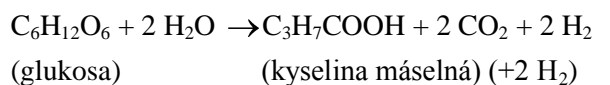
Při teplotách okolo 20 °C trvá rozklad cca 2 měsíce, při nejvyšších běžně používaných teplotách (mírně nad 40 °C) stačí již jen asi 10 dní. Finální tvorbu metanu však inhibuje značné množství látek. Literatura se zmiňuje hlavně o organických kyselinách a sloučeninách dusíku, jako je například amoniak.
[1]

3.2.1 Reakce

Tvorba bioplynu je velice komplexní proces. Nejedná se pouze o poslední krok, jímž je myšlen vznik molekuly metanu, ale velice důležité jsou předcházející reakce. Meziprodukty reakcí závisí především na zpracovávané surovině a použitých mikroorganismech. Při rozkladu polysacharidů bývá často meziproduktem glukosa.

Její rozklad za následné tvorby metanu probíhá následovně:





Pro činnost metanogenů a pro průběh reakcí směřujících k metanu má velký význam přítomnost vodíku a jeho množství. Redukce i oxidace elektronových přenašečů jsou silně vodíkem ovlivňovány. Kladná hodnota ΔG° znamená, že reakce za standardních podmínek nemůže probíhat. Může být realizována pouze tehdy, kdy je parciální tlak vodíku velice nízký. Vodík tímto způsobem neovlivňuje pouze rychlost, ale i směr reakcí. Výše uvedený rozklad glukosy probíhá s ovlivněním rovnováhy přítomným vodíkem od procesů, které vodík produkují až k jeho spotřebě. Kyseliny se dále rozkládají až na acetát, který je předposledním krokem ke vzniku metanu. Tyto rozklady jsou však také silně ovlivněny přítomností vodíku, jelikož při těchto reakcích je vodík také produkován. Mnohem více je v tomto směru znevýhodněn rozklad kyseliny propionové. Často musí hydrogenotrofní metanogeny nejprve dramaticky snížit parciální tlak vodíku, aby acetogeny mohly dokončit rozklad složitějších kyselin až na kyselinu octovou. Energetický zisk tvorby metanu z kyseliny octové je však s porovnáním tvorby z vodíku a oxidu uhličitého značně nižší. [1]

3.2.2 Vliv teploty na tvorbu metanu

Z podmínek pro tvorbu metanu je asi nejdůležitější vliv teploty. Teplota má intenzivní vliv na fyziologický stav mikroorganismu a především na rychlost jeho metabolismu. Obecně se dá říci, že reakční rychlost a rychlost růstu mikroorganismu vzrůstá společně s teplotou. Metanogeneze v přírodě probíhá při teplotách v mezích 0-97 °C. Pro průmysl jsou však nezajímavé extrémní hodnoty a to až už horní nebo dolní. Při nízkých teplotách procesu se nedosahuje uspokojivých rychlostí, při vysokých teplotách vznikají značné ekonomické ztráty při ohřevu a vyšší náročnosti zařízení. V průmyslu se s úspěchem využívá mezofilních a termofilních kmenů mikroorganismů, které pracují v rozmezí 15-40 °C a 50-60 °C. Některé literární zdroje uvádějí teploty vyhraněnější. Optimální teplotou pro mezofilní kmeny je 35 °C a pro kmeny termofilní je to teplota 55 °C.

3.2.3 Vliv pH na tvorbu metanu

Další z diskutovaných parametrů pro tvorbu metanu je hodnota pH prostředí. Metan produkující bakterie mají svá optima v oblasti pH 6,2-7,8. Pokles pH pod hodnotu 6 je doprovázen inhibicí díky vzniku neionizovaných kyselin a nárůst nad pH 7,6 může procesy inhibovat zvýšením koncentrace volného amoniaku. V tomto směru je velice důležité, aby se zachovala rovnováha mezi jednotlivými procesy. Jestliže pH v reaktoru začne klesat, může to být způsobeno přetížením anaerobní biomasy, kdy produkce kyselin v acidogenní fázi značně převyšuje jejich spotřebu v acetogenní a metanogenní fázi. Vysoká koncentrace těchto kyselin pak inhibuje metanogenní bakterie a produkce bioplynu se tak výrazně

zpomalí nebo dokonce zastaví. Literatura uvádí, že se jedná o koncentrace acetátu nad 800 mg.l⁻¹. Tento stav indikuje i zvýšený parciální tlak vodíku .

3.2.4 Využití bioplynu

Bioplyn lze využívat více způsoby. Jedním z nich je přímé spalování v hořácích například při vaření, může se totiž po úpravě dodávat do rozvodných plynovodních sítí. Bioplyn by měl být zbaven nežádoucích příměsí, hlavně sulfanu (koroze hořáků oxidem siřičitým a sírovým). Tento způsob využití se však zatím příliš nerozšířil, jelikož kapacita výrobních jednotek zatím není příliš vysoká. Dalším možným využitím bioplynu je vytápění. Pro vytápění bioplynem se používají kotle s atmosférickými hořáky do výkonu přibližně 30 kW nebo dmýchadlové kotle pro větší výkony. V současnosti se však nejvíce rozšířilo využití bioplynu pro výrobu elektřiny a tepla v kogeneračních jednotkách. Na rozdíl od elektráren, kdy je teplo vzniklé při výrobě elektrické energie vypouštěno do okolí, využívá kogenerační jednotka toto teplo pro vytápění. Účinnost výroby elektrické energie se v elektrárnách pohybuje od 25 do 35 %. Oproti tomu kogenerační jednotka pracuje díky využití tepla s daleko vyšší účinností 80 až 90 %. Teplo i elektrická energie navíc vznikají v místě své spotřeby, tudíž odpadají náklady na přenos i ztráty způsobené dálkovým rozvodem. Anaerobní digesce se intenzivně zavádí i v rozvojových zemích, kde se využívá zejména jako zdroj levné energie pro drobné farmáře, pro které bioplyn slouží k vaření i svícení.

Zde jsou některé výhody vesnických rodin, jež si pořídily anaerobní bioreaktor:

- levný a čistý zdroj energie
- stabilizace exkrementů hospodářských zvířat a popř. i domovního bioodpadu
- produkce kvalitního hnojiva (zbytek po AD) – živiny obsažené v exkrementech nejsou znehodnoceny při spalování, ale zůstávají vázané na organickém materiálu, což zvyšuje kvalitu hnojiva
- snížení nemocnosti v domácnostech v porovnání se spalováním sušených kravěnců, což dráždí dýchací cesty a oční sliznici
- zkrácení doby potřebné pro získávání paliva a vaření
- náhrada palivového dřeva bioplynem vede k omezení odlesňování a snížení eroze

V zemích s rozvinutým hospodářstvím se uplatňuje spíše technologie AD pro zpracovávání kejdy a hnoje z velkochovů. V průběhu posledních několika let se však rozvíjí také výroba bioplynu z komunálního bioodpadu a zatím především experimentálně se ověřuje možnost biozplyňování některých energetických rostlin. Jako konkrétní příklad využití bioplynu může sloužit pražská čistíčka odpadních vod, která využívá bioplyn z vyhnívacích nádrží k pohonu speciálních dieselektrických agregátů. Vyrobenou elektřinou pokrývá zhruba 50 % své spotřeby energie. [2]

3.3 Výhody a nevýhody anaerobních procesů

Hlavní předností anaerobních procesů vůči aerobním je přeměna organických látek na vysoce energeticky bohatý bioplyn. Tento poznatek jednoznačně vyplývá z porovnání bilance energie a uhlíku obou procesů.

- a) Při aerobních procesech se přibližně 60 % energie spotřebuje na tvorbu nové biomasy a 40 % se ztrácí ve formě reakčního tepla.
- b) Při anaerobních procesech se téměř 90 % energie původně obsažené v substrátu zachová ve vznikajícím bioplynu, pouze 5 až 7 % je spotřebováno na růst nové biomasy a 3 až 5 % se ztrácí ve formě reakčního tepla.
- c) Při aerobních procesech je asi 50 % uhlíku ze substrátu přeměněno na biomasu a 50 % na oxid uhličitý.
- d) Při anaerobních procesech přechází 95 % uhlíku do bioplynu a 5 % do biomasy. [9]

3.4 Suroviny pro tvorbu bioplynu

Okruh surovin pro výrobu bioplynu je velice široký. Nejvýznamnější surovinu pro tvorbu bioplynu představuje zbytková biomasa, které vzniká nejvíce v zemědělství. Jedná se především o odpady z živočišné výroby a nevyužité zbytky rostlin. Exkrementy hospodářských zvířat je dnes stále obtížnější využívat jako hnojivo v rostlinné výrobě z důvodu zpříšňujících se předpisů i proto, že mnoho velkochovů zvířat bylo v minulosti vybudováno bez jakýchkoliv vazeb na půdu. Dále jde o zbytky z rostlinné výroby, pro které není žádné jiné uplatnění, případně o cíleně pěstovanou nepotravinářskou produkci. K výrobě bioplynu lze taktéž využít dokonce poražená, usmrcená nebo poslá zemědělská zvířata, zvěř ze ZOO a domácí zvířata a tím i zajistit jejich bezpečnou likvidaci. Dalším důležitým zdrojem biomasy jsou také odpady z údržby zeleně, jak komunální tak i soukromé, a kaly z čistíren odpadních vod. Významným zdrojem zbytkové biomasy je také sféra komunálních odpadů. Biologicky rozložitelný odpad tvoří asi 40 %ní hm. podíl komunálního odpadu. Návrh plánu odpadového hospodářství ČR stanovuje postupné snižování skládkování komunálního odpadu a směrnice o skládkování odpadu vyžaduje postupné snižování procenta organických odpadů ukládaných na skládky, což by mělo přispět k rozvoji technologií pro zpracování bioodpadů. [17]

3.4.1 Biomasa

Biomasa je organická hmota rostlinného nebo živočišného původu. Získává se jako odpad ze zemědělské, průmyslové činnosti, nebo jako komunální odpad. Biomasa může být i výsledkem záměrné výrobní činnosti v zemědělství a lesnictví. Je to nejstarší lidmi využívaný zdroj energie a má obnovitelný charakter. Ekologické a efektivní využití biomasy nemá téměř žádný negativní vliv na životní prostředí. Pokud ano tak pouze minimální. Biomasu je možné využívat pro přímé spalování nebo i k výrobě ušlechtilých paliv, které jsou podstatně méně zatěžující pro životní prostředí než klasická paliva (černé, hnědé uhlí, lignit, ropa, ...). Její výroba je pro životní prostředí spíše přínosem (likvidace odpadů,

zalesňování nevyužité a často nevyužitelné půdy), zatím co dobývání fosilních paliv je pro životní prostředí devastující. [17]

tab.1 Specifická tvorba bioplynu

Látka	Specifická produkce bioplynu (Nm^3 plynu kg^{-1} rozložené látky)	Obsah CH_4 v plynu (%)	Výhřevnost (MJ Nm^{-3})
tuky	1,125-1,515	62-67	cca 23,45
sacharidy	0,79-0,875	50	17,76
bílkoviny	0,56-0,75	71-84	cca 24,87
čistírenský kal	0,80-1,30	65-75	cca 23,0
prasečí exkrementy	1,07	64-70	cca 22,0
odpadní vody z výroby pektinu	0,56	cca 50	cca 17,0
odpadní vody z výroby droždí	0,5-0,7	66-71	cca 22,0

3.4.2 Odpady

Za odpad jsou všeobecně pokládány látky, které již nemůžeme nebo z ekonomických důvodů nechceme dále využívat. Jiné definice zase nazývá odpadem nepotřebný produkt lidské činnosti v daném čase. Odpady můžeme dělit na nevyužitelné a využitelné. Nevyužitelný odpad je potřebné alespoň nějakým způsobem zneškodnit. Využitelný odpad slouží nebo může, či by spíše měl sloužit jako sekundární surovina. Odpad může být využitelný buď přímo nebo po úpravě. O využitelnosti odpadu rozhodují nejen jeho kvalitativní vlastnosti, ale i jeho produkované množství v místě zdroje a místní podmínky. [15]

3.4.3 Typy odpadů

Hlavní zdroje poskytující v biologicky rozložitelných podílech odpadů či biomasy metan jsou polysacharidy, proteiny a lipidy. Jak již bylo výše zmíněno, produkce bioplynu je velice závislá na chemickém složení využívané suroviny nebo odpadu. I když se z odpadů obsahujících lipidy a bílkoviny může vyrobit více bioplynu, jsou tyto výchozí suroviny posunuty do pozadí před produkcí bioplynu z polysacharidů a to zejména polysacharidů typu celulózy a hemicelulózy. Odpady proto můžeme dělit podle jejich zdroje z čehož vyplývá i jejich složení.

- rostlinné zbytky ze zemědělské prvovýroby a údržby krajiny (sláma kukuřice a obilovin, řepková sláma, zbytky z lučních areálů a nedopasky, zbytky po likvidaci náletových dřevin a odpady ze sadů a vinic)
- odpady z živočišné výroby (exkrementy z chovů hospodářských zvířat, zbytky krmiv, odpady z mléčnic a přidružených zpracovatelských kapacit)

- biologicky rozložitelné komunální odpady (separovaný sběrový papír, kuchyňské odpady, organické zbytky z údržby zeleně a podobně)
- organické odpady z průmyslových a potravinářských výrob (odpady z provozů na zpracování a skladování produktů rostlinné výroby, jateční a mlékárenské odpady, odpady z lihovarů a konzerváren, vinařských a dřevařských provozoven)
- lesní odpady (dřevní hmota z probírek, kůra, větve, pařezy, kořeny po těžbě dřeva, palivové dřevo, klestí, odřezky atd.)

Biologická rozložitelnost a tím i výtěžnost bioplynu závisí na chemickém složení substrátu, především na obsahu množství sacharidů, tuků, proteinů a na obsahu celulózy, hemicelulózy a ligninu a na jejich vzájemném poměru. Vzhledem k tomu, že obsah jednotlivých komponent se liší, odlišná je i jejich rozložitelnost a výtěžnost metanu. Ke zvyšování biologické rozložitelnosti různých odpadů se začínají stále více uplatňovat různé metody předúpravy zpracovávaného materiálu.

Cílem předúpravy je:

- zvýšení produkce bioplynu
- prohloubení rozkladu zpracovávaného materiálu – minimalizace

Metody předúpravy zahrnují především dezintegraci a homogenizaci. Zmenšení velikosti částic vede k dosažení zvětšení jejich povrchu a tím i k lepšímu zpřístupnění biologickému rozkladu. Další skupinou metod následujících po dezintegraci jsou různé fyzikálně-chemické a biochemické metody předpravy (termická úprava, oxidační a termooxidační úpravy, kyselá nebo alkalická hydrolyza, úpravy přidavkem enzymů apod.) [15]

3.4.4 Odpadní vody

Vzniku odpadních vod se nelze a v blízké budoucnost ani nepůjde, v průmyslových procesech vyhnout, proto je opodstatněná snaha o co nejmenší množství produkováných odpadních vod, snaha o jejich recyklaci, nebo jejich opětovné využití. Výhodné je separovat jednotlivé druhy odpadních vod již v místě jejich vzniku, což umožňuje jejich oddělené čištění podle specifického obsahu živin.

Složky průmyslových odpadních vod

Z průmyslových závodů a výroben jsou vypouštěny průmyslové odpadní vody, které obsahují:

- a) Odpadní vody od zaměstnanců závodu, včetně odpadních vod ze závodních kuchyní, jídelen a podobných zařízení. Jsou to v podstatě vody splaškové.
- b) Odpadní vody srážkové, odváděné z areálu závodu. Tyto jsou zpravidla na rozdíl od ostatních srážkových vod odváděných veřejnou kanalizací zpoplatněné a tedy měřené (většinou nepřímou metodou z rozlohy závodu, kvality povrchu a průměrné intenzity ročních srážek). Jejich kvalita je dána stupněm znečištění povrchu areálu závodu a charakterem srážky (intenzitou, dobou trvání).

- c) Odpadní vody chladicí. Tvoří často významný podíl u celkového objemu odpadní vody vypouštěné z průmyslového závodu. Jsou jen málo znečištěné, a proto je snaha o jejich opětovné využití v závodě (recirkulace).
- d) Odpadní vody technologické, odpadající přímo z technologických procesů. V mnoha případech tvoří látky v nich obsažené svým množstvím i charakterem nejvýznamnější složku z celkového znečištění. Lze k nim přiřadit i odpadní vody z úpravy napájecích vod (bývají značně zasolené) a dopravní vody (příp. odluh z jejich recirkulace), používané k transportu surovin materiálu i odpadů (popelé, řepy, brambor aj.). [15]

4 Anaerobní technologie

Anaerobní fermentace je biologický proces rozkladu organické hmoty, který probíhá bez přístupu vzduchu. Tento proces probíhá v přírodě přirozeně např. v bažinách, na dně jezer nebo na skládkách komunálního odpadu. Při tomto procesu kultura různých mikroorganismů v několika stupních postupně rozkládá organickou hmotu. Produkt jedné skupiny mikroorganismů se stává substrátem pro další skupinu. Proces můžeme rozdělit do 4 hlavních fází:

- 1. Hydrolýza:** působením extracelulárních enzymů dochází mimo buňky ke hydrolytickému štěpení makromolekulárních látek na jednodušší sloučeniny, především mastné kyseliny a alkoholy, při tomto procesu se uvolňuje rovněž vodík (H_2) a oxid uhličitý (CO_2).
- 2. Acidogeneze:** působením extracelulárních enzymů dochází mimo buňky ke hydrolytickému štěpení makromolekulárních látek na jednodušší sloučeniny, především mastné kyseliny a alkoholy, při tomto procesu se uvolňuje rovněž vodík (H_2) a oxid uhličitý (CO_2).
- 3. Acetogeneze:** dochází k dalšímu rozkladu kyselin a alkoholů za produkce kyseliny octové.
- 4. Methanogeneze:** závěrečný krok anaerobního rozkladu, kdy z kyseliny octové, H_2 a CO_2 vzniká methan - CH_4 , tento krok provádějí methanogenní bakterie, což jsou striktně anaerobní organismy, podobné nejstarším organismům na Zemi. Tyto bakterie jsou citlivé především na náhlé změny teplot, pH, oxidačního potenciálu a další inhibiční vlivy.

Anaerobní procesy může dělit z hlediska reakčních teplot podle optimální teploty pro mikroorganismy na psychrofilní ($5-30^{\circ}C$), mezofilní ($30-40^{\circ}C$), termofilní ($45-60^{\circ}C$) a extrémně termofilní (nad $60^{\circ}C$). Procesy s vyšší teplotou mají hlavní výhodu ve vyšší účinnosti hygienizace materiálu. Nejčastěji se dnes používají mezofilní procesy při teplotě cca $35-38^{\circ}C$.

Fermentace se obvykle provádí ve velkých vyhřívaných nádržích, které umožňují promíchávání materiálu – fermentorech. Jedná se o kontinuální nebo semikontinuální proces. Pracovní sušina suspenze se dle materiálu a použitého míchacího systému pohybuje mezi 4 – 12%. Ve fermentorech dochází k odbourání 50 – 70% organické sušiny materiálu. Velikost nádrží se odvíjí od množství a kvality materiálu, množství aktivní biomasy v reaktoru a požadované doby zdržení. Tyto parametry jsou významné pro průběh produkce bioplynu i kvalitu výstupního materiálu.

Hlavním produktem anaerobní fermentace organické hmoty je bioplyn. Bioplyn je bezbarvý plyn skládající se hlavně ze směsi methanu a oxidu uhličitého v poměru cca 60:40. Bioplyn však většinou obsahuje ještě malá množství N_2 , H_2S , NH_3 , H_2O , ethanu a nižších uhlovodíků. Z následující tab.2 si je možno udělat představu o složení a vlastnostech různých vybraných druhů bioplynů. Hodnoty jsou však pouze informativní, skutečné vlastnosti bioplynu se vždy odvíjí od mnoha faktorů, zejména na fermentovaném materiálu. [15]

tab. 2 Srovnání základních vlastností různých bioplynů [13]

Parametr	Skládkový plyn	Bioplyn (ČOV)	Bioplyn (prasečí kejda)
¹⁾ Výhřevnost (MJ/m ³)	16,9	21,1	24
H ₂ (%)	1	1	-
CO (%)	1	-	-
O ₂ (%)	3	-	-
N ₂ (%)	-	-	-
Cl ⁻ , F ⁻ (mg/m ³)	-	-	-
NH ₃ (mg/m ³)	-	-	40
CO ₂ (%)	46	38	31
CH ₄ (%)	49	61	69
H ₂ S (mg/m ³)	350	1 000	²⁾ 2 300
¹⁾ vztaženo na 15°C, 101 325 Pa.		²⁾ na vstupu do odsířovacího zařízení.	

Vedlejším produktem fermentace je stabilizovaný anaerobní materiál, který bývá také označován jako fermentační zbytek, digestát, fermentát, jenž je v současnosti nejčastěji používán jako hnojivo.

4.1 Technologie získávání skládkového plynu

Odplynění skládky zabraňuje nežádoucímu hromadění skládkového plynu, čímž by mohlo dojít k porušení izolační bariéry skládky (foliové nebo jílové) a předchází jeho úniku či případnému výbuchu. Při biologickém rozkladu některých organických látek uložených ve skládkovém tělese dochází ke vzniku skládkového plynu, jehož podstatnou část tvoří metan a oxid uhličitý. Jeho vznik závisí na materiálu jenž je na skládku ukládán, a v jakém stadiu rozkladu uložených organických látek se skládka nachází. Vzniká však vždy u skládek komunálního odpadu. Skládkový plyn, pokud není ze skládky uměle odčerpáván, pohybuje se vrstvami uložených odpadů i vrstvami podloží skládky a to nerovnoměrně všemi směry. Tím hrozí nebezpečí vytvoření výbušné směsi se vzduchem a to i ve značné vzdálenosti od tělesa skládky. Kromě toho skládkový plyn snižuje koncentraci kyslíku ve vrchní, krycí vrstvě skládky, což často značně znesnadňuje provedení biologické rekultivace. Odvádění plynu tedy není nutné jen z důvodu možnosti energetického využití plynu, ale i z důvodu ochrany životního prostředí, tedy prevence znečištění atmosféry, ale i z důvodu nebezpečí exploze nahromaděného plynu. Každá skládka však nemusí být vybavena technologií pro odvod plynu. I když jsou skládky technicky odplyňované, může být zachycena pouze část mezi 20 – 70 % skutečně vzniklého plynu.

Podle způsobu odtahování plynu lze dělit systémy na :

- pasivní, kdy plyn uniká vlivem vlastního tepla
- aktivní, kdy je plyn odsáván vhodným potrubím do sběrného a jímacího zařízení

Z technického hlediska se odplyňovací systémy dělí na:

- vertikální
- horizontální
- kombinované

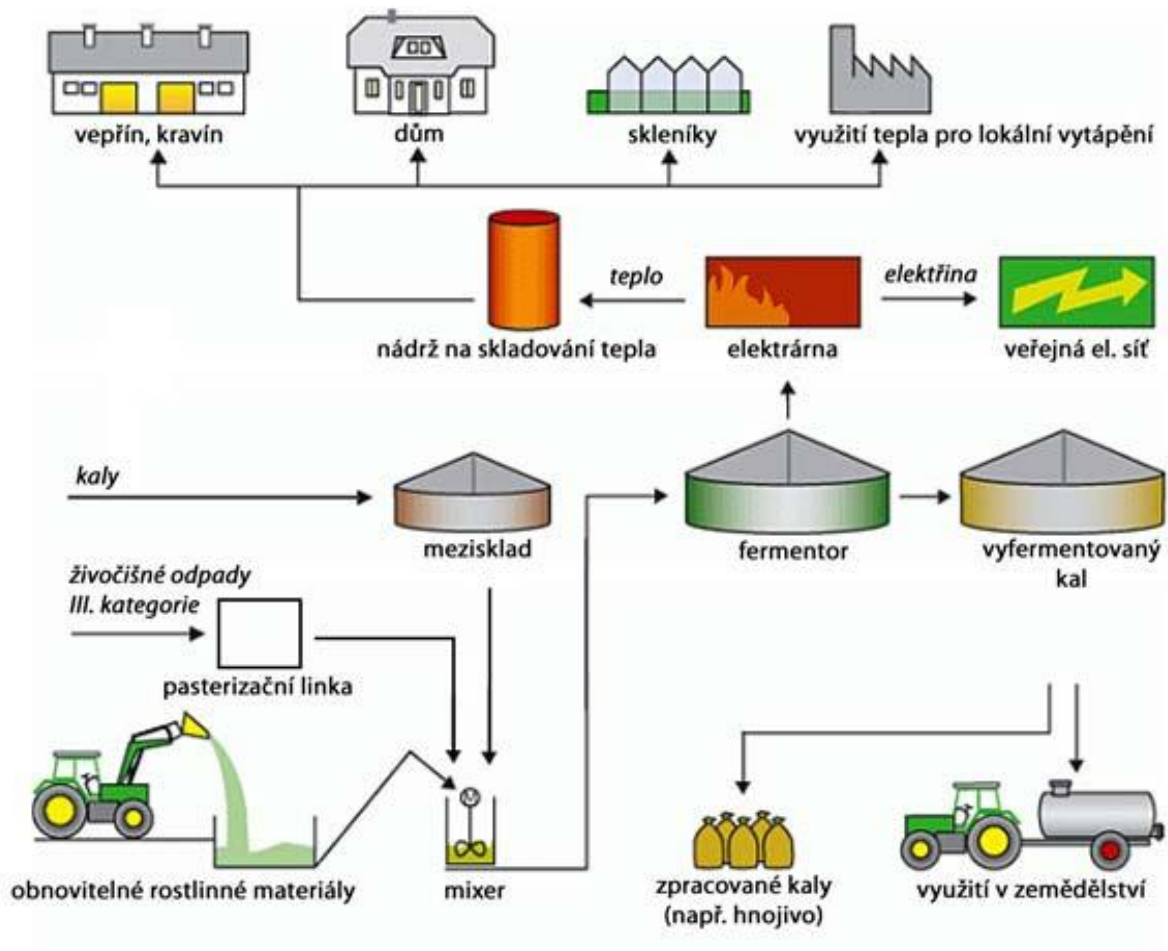
Jako vertikální odplynění se označuje jímací zařízení ve tvaru šachet a studní, v nichž se plyn shromažďuje. Odtud je plyn odsáván přes svodné potrubí a regulační šachty do sběrače plynu sloužícího pro kogenerační jednotky, nebo přímo k pochodni, kde je spalován. Plynové studny se zakládají už na dně skládky a postupně se staví současně s navyšováním skládky navážením odpadu. Studny jsou tvořeny z betonových perforovaných skruží. Ke dnu studny je přivedeno vodní potrubí, které je ze skladového tělesa vyvedeno po jeho dně. Vnitřek studny se zasypává hrubým kamenivem. Další možností je vybudovat studny pomocí pražicového bednění, jehož vnitřek se také vyplní hrubým kamenivem a po naplnění určité vrstvy se pažení povytáhne do vyšší polohy. Vznikají tak svislé plynové studny ze sypaného kameniva bez bočního ostění, které jsou nazývány šterkové sloupy. Tímto způsobem se dosáhne nejpříznivějšího přístupu skládkového plynu k odsávacím plynovým trubkám. Nejmenší průměr užívaných plynových studní je 80cm, jejich vzájemná poloha nesmí překročit vzdálenost 40m.

Horizontální odplynění skládky je zajištěno drenážním potrubím. To se ukládá ve vrstvách vzdálených od sebe asi 5m na dně skládky, poté se s rostoucí výškou vrstvy vzdálenosti zvětšují až na asi 10m. Jednotlivá potrubí ve vrstvě jsou od sebe vzdálena asi 20 až 30m. Tato plynovodní potrubí odvádějí nejen plyn, ale i kondenzát, případně průsakovou vodu. Proto se volí jejich mírný sklon a na nejnižším místě se poté budují odvodňovače.

Kombinované odplynění slouží k dokonalejšímu zachycení produkovaného plynu. Je kombinací obou předchozích systémů. Používá se hlavně u velkých skládek se značnou výškou. Odsávací potrubí ústí do regulačních šachet. Zde jsou umístěny regulační prvky, které umožňují regulaci rozložení odsávacího tlaku do jednotlivých plynových studní. Regulace je potřebná proto, že každá studna není zavážena stejně a nemusí produkovat stejné množství plynu. U odsávaného plynu se registruje hlavně jeho množství, teplota, tlak a množství etanu a kyslíku. Podle toho se pak řídí celý systém odčerpávání plynu.

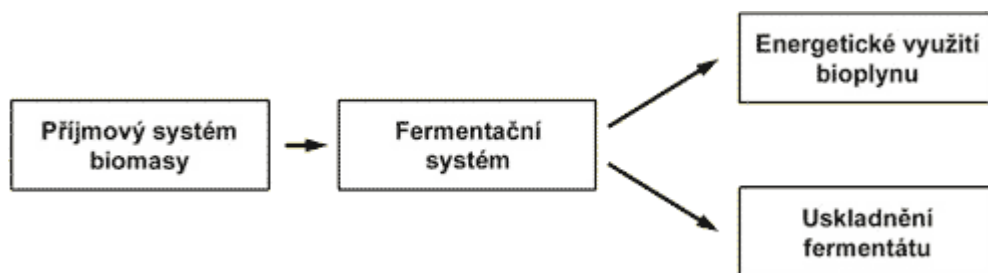
4.2 Technologie mokré fermentace

Mokrá fermentace je v dnešní době nejpoužívanější technologií výroby bioplynu s bohatými referenčními odkazy. Na obr. 1 je zjednodušené schéma bioplynové stanice s mokrou fermentací. Je vhodná pro zpracovávání substrátů s výsledným obsahem sušiny <12%. Mokrá anaerobní fermentace probíhá v hermeticky uzavřených v nádobách s velkým objemem (fermentorech/reaktorech). Tyto nádoby bývají vyhřívány na navrženou provozní teplotu (běžně 35°C až 55°C) a promíchávány. [12]



obr. 1 Zjednodušené schéma bioplynové stanice a její využití [16]

Technologickou linku tvoří 4 základní stavebně-technologické celky zobrazené ve schématu na obr 2.



obr. 2 Blokové schéma technologie mokré fermentace [13]

1. Příjmový systém: slouží k přípravě čerstvého substrátu před jeho vstupem do fermentoru což zahrnuje úpravu velikosti částic, míchání, homogenizaci, úpravu TS, ředění, apod.) a jeho optimální dávkování do anaerobního procesu. Podle druhu zpracovávané biomasy sestává z příjmového zásobníku tuhé biomasy ($TS > 20\%$) a příjmové jímky kapalné biomasy ($TS < 12\%$).

2. Fermentační systém: místo kde probíhá vlastní anaerobní vyhnívání v čistě anaerobním prostředí. Běžně se využívá několik základních koncepcí fermentačního systému, např.:

Fermentor s integrovaným plynojemem.

Fermentor + samostatný plynojem.

Fermentor typu "kruh v kruhu" + samostatný plynojem.

Fermentor + dohňovací nádrž s integrovaným plynojemem, apod..

Fermentory lze koncipovat jako nadzemní, podzemní nebo částečně zapuštěné do terénu. Na tom zda se bude jednat o částečné/úplné zapuštění fermentoru do terénu záleží nejen na přání investora, ale i na dalších okolnostech např. na potřebě úprav podloží z důvodu jeho snížené únosnosti, nutnosti potlačení vlivu stavby na charakter krajiny, apod.. V zemědělství je nejčastěji využíván systém válcových železobetonových plynotěsných fermentorů se svislou osou a poměrem průměr : výška > 1 . Je však možné využít i jiný materiál (např. ocel) či jiná konstrukce. Běžný rozsah základních procesních parametrů podle druhu technologie a substrátu: $t < 35; 40 > ^\circ\text{C}$, $\text{pH} \approx 6,5$ až $7,5$, hydraulická doba zdržení $< 35; 110 >$ dnů, jedno respektive dvou stupňový anaerobní proces. Fermentor je vybaven odpovídajícím příslušenstvím, které závisí na konstrukci a druhu substrátu. Běžně jde o topný a míchací systém, v případě potřeby je možné provádět odsíření bioplynu – např. dávkováním malého množství vzduchu do bioplynu, apod..

3. Uskladňovací systém: stabilizovaný materiál po fermentaci (fermentační zbytek nebo také digestát/fermentát) je nutné uskladnit v souladu se zásadami správné zemědělské praxe (nitratových směrnic). V případě kdy je fermentační zbytek separován na tuhou frakci (sušina ≈ 25 až 35%) a kapalnou fází/fugát (sušina $< 1\%$) je nutno uskladňovací systém koncipovat pro obě frakce. Tuhá frakce je většinou uskladňována na stávajících hnojištích nebo jiných vodohospodářsky zabezpečených plochách. Fugát (sušina $< 1\%$) resp. neseparovaný fermentační zbytek (sušina ≈ 4 až 10%) se uskladňuje v jímkách s vhodným dimenzováním. Potřebná velikost uskladňovacího systému u farmářských bioplynových stanic je volena s ohledem na splnění zásad správné zemědělské praxe tzn. pro dobu 140 až 150 dnů. Separční zařízení (kalolis, odstředivka, centrifuga, apod.) bývá osazováno z důvodu záměrného využití fugátu pro ředění čerstvého substrátu na požadovanou procesní sušinu nebo v případě zvláštních technologických požadavků farmy. Vlivem recirkulace fugátu se úměrně tomu snižuje potřebná velikost uskladňovací jímky a také se snižuje spotřeba vody nutné pro ředění. Je ovšem nezbytně nutné pravidelně kontrolovat obsah dusíku v recirkulovaném fugátu z důvodu zamezení inhibičním vlivům na anaerobní proces.

4. Energetické využití bioplynu: obecně lze využívat BP mnoha způsoby, např.:

a. Výroba tepla v teplovodních (horkovodních) resp. parních kotlích

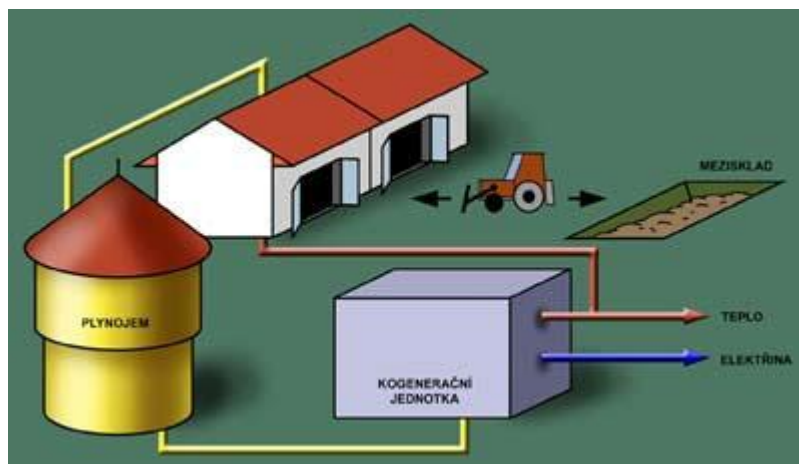
- b. Kombinovaná výroba elektřiny a tepla (KVET) v kogeneračních jednotkách (různé principy)
- c. Čištění BP a jeho prodej do plynárenské sítě resp. provozovatelům jiných energetických systémů (CZT, průmyslové teplárny, apod.)
- d. Čištění a jeho využití pro pohon dopravní techniky a automobilů, apod.

Z hlediska aktuálních podmínek na trhu s energiemi v ČR je bioplyn nejčastěji využíván pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla v tzv. kogeneračních jednotkách. [6]

4.3 Technologie suché fermentace

Suchá fermentace zpracovává substráty o vyšším obsahu sušiny - 30 až 35%. Zpravidla se jedná o aplikace mezofilního anaerobního procesu s rozsahem používaných reakčních teplot 32-38°C. Optimální pH se pohybuje mezi 6,5 - 7,5. V zásadě lze rozdělit technologie na diskontinuální (vsázkové) a kontinuální.

Diskontinuální technologie suché fermentace se sestává z několika reakčních komor (nejčastěji zděných komor s plynotěsnými vraty nebo kovových kontejnerů) a meziskladu. Doprava zpracovávaného materiálu do komor a z nich je nejčastěji prováděna běžnou manipulační technikou (např. čelní kolový nakladač, traktor s čelním nakladačem). Anaerobní proces se řídí úpravou dávkování procesní tekutiny. Proces je diskontinuální což znamená vyprázdněním a novým naplněním komory, následuje start reakce trvající cca 3 dny a nakonec vlastní reakce a produkce bioplynu trvající 24-27 dnů. Podle druhu výstavby je můžeme rozdělit na výstavbové („na zelené louce“) a vestavbové - využívají instalace lehčených fermentačních komor do nevyužívaných objektů - v zemědělství např. seníky, ocelokolny, kravíny, apod.. Principiálně lze technologii navrhovat jako jedno případně vícestupňovou (což je samozřejmě investičně a provozně náročnější) Princip je uveden na Obr 3.



obr. 3 Technologie suché fermentace, diskontinuální technologie [13]

Pro potřeby inokulace je využíváno jednak pravidelné vstřikování tzv. perkolátu - látky s obsahem vhodných kultur anaerobních mikororganismů a přidavků části fermentačního zbytku z předchozího cyklu do čerstvé dávky substrátu. Kontinuální technologie jsou doprovázeny vysokou investiční a provozní náročností a jsou využívány zpravidla pro zpracování komunálních a tříděných domovních odpadů. Reakční objem bývá rozdělen na několik fermentorů. Běžně jsou využívány ležaté fermentory (válcové i komorové) s 1 pomaloběžným míchacím zařízením, uloženým napříč celým fermentorem. Konkrétním příkladem technologie je např. systém KOMPOGAS. Tento systém využívá železobetonové reaktory ve tvaru plynotěsných komor. Dávkování biomasy do reaktoru zajišťuje hydraulický dopravní systém, který odebírá biomasu z mezizásobníku a „postrkuje“ ji přes předehřivací trubkový výměník tepla (provedení „trubka v trubce“) do zadní části reakční komory. Pohyb, míchání a vyprazdňování reaktoru zajišťuje šnekový dopravník, který je uložen uvnitř reakční komory. Vyprazdňování fermentačního zbytku probíhá na čele reakční komory, odkud je pro další zpracování odebírán systémem dopravních cest. [11]

4.4 Srovnání technologií

Skládkový bioplyn

- výhody - snížení zápachu
nižší riziko exploze
usnadnění biologické rekultivace
- nevýhody - různá účinnost (podle druhu odpadu a způsobu ukládání)
značně proměnlivé složení bioplynu

Mokrý fermentace

- výhody - historicky rozšířenější
širší uplatnění
technicky propracovanější
provozně prověřené
- nevýhody - vyšší provozní náklady (bohatší technologická výbava a příslušenství – míchadla, čerpadla, drtiče, separátory apod.)
vyšší poruchovost

Suchá fermentace

- výhody - bioodpady s vyšší sušinou (BRKO)
nižší investiční náklady
- nevýhody - obtížnější splnění legislativních požadavků pro průmyslové a komunální projekty
malý počet realizací
nižší výtěžnost bioplynu

Z hlediska četnosti lze konstatovat, že mokrá fermentace je silně převažující nad suchou fermentací. Je to dáno historií, neboť většina bioplynových stanic je stavěna u intenzivních chovů zvířat. Také je nutno podotknout, že k suchým technologiím existuje poměrně silná nedůvěra investorů a některých odborníků. Literární prameny uvádí, že stávající aplikace suché cesty mívá, ve srovnání s mokrou, nižší specifické výtěžnosti bioplynu. Je třeba si ovšem uvědomit, že suché fermentory zpracovávají substráty s cca 3-4 násobným obsahem organické hmoty oproti reaktorům na mokrou cestu. Suché technologie jsou zpravidla využívány u bioplynových stanic, které zpracovávají komunální a domovní odpady. V zemědělství ji lze zaznamenat jen zcela výjimečně. Nicméně je nutné si uvědomit, že každá technologie má své výhody a nevýhody. Např. suchou fermentaci lze použít i u biomasy, kterou nelze mokrou cestou jednoduše zpracovat (např. podestýlky na bázi pilin – v mokré cestě tvoří krusty, ucpávají čerpadla, nedokonale vytríděné bioodpady - příměsi plastů, dřeva, kovů, zeminy, atd.). Z výše uvedeného je patrné, že je vždy nutné navrhovat technologii pro každý projekt individuálně. Samozřejmým a zcela základním dokumentem je proto studie proveditelnosti, která řeší všechny aspekty záměru a budoucího provozu, a to vč. využití přebytků tepla.

5 Kogenerace

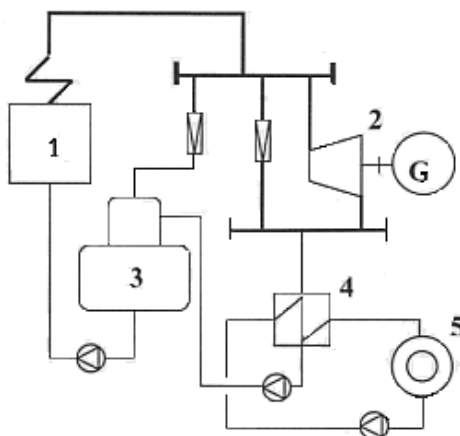
Kogenerací se nazývá proces kombinované výroby elektrické energie a tepla. Pokud dochází také k výrobě chladu tak hovoříme o trigeneraci.

5.1 Kogenerace s parními turbínami a motory

Princip použití parních turbín v tepelném kogeneračním zdroji

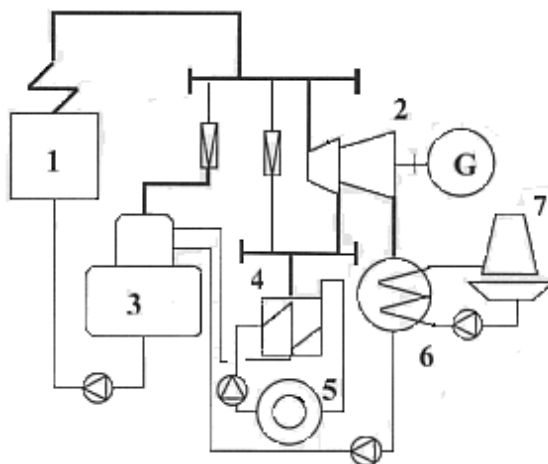
Parní turbíny se jako motory pro průmyslová kogenerační zařízení používají dlouhá léta. Pokud se parní turbína použije jako motor kogeneračního systému je možný dvojí způsob zapojení:

- parní turbína protitlaková (obr. 4)
- parní turbína kondenzační s odběrem páry pro dodávku tepla spotřebiteli (obr. 5)



obr. 4: Základní schéma zapojení protitlakové parní turbíny [5]

1 – parní kotel, 2 – parní turbína, 3 – napájecí nádrž, 4 – ohřívák topné vody, 5 – spotřebič tepla



obr. 5: Základní schéma zapojené kondenzační parní turbíny s odběrem páry [5]

1 – parní kotel, 2 – parní turbína, 3 – napájecí nádrž, 4 – ohřívák topné vody, 5 – spotřebič tepla, 6 – kondenzátor, 7 – chladicí věž

Nejjednodušší uspořádání je provedení s protitlakovou turbínou, kde veškerá pára po průchodu turbínou má relativně nízký tlak a slouží k dalšímu teplárenskému využití. Tam, kde je vyžadován dvoustupňový ohřev topné vody se druhý stupeň ohřevu provádí buď pomocí odběru z turbíny nebo někdy parou odebíranou z výstupu kotle a redukovanou na požadovaný tlak.

Parní protitlaková turbína představuje kogenerační zapojení používané v minulosti nejčastěji (již od dob prvního uplatnění turbín na přelomu 19. a 20. století). Vysokotlaká pára z kotlů expanduje v turbíně a produkuje mechanickou energii, která se používá k pohonu elektrického alternátoru. Výkon turbíny závisí na množství expandující páry a také na požadované kvalitě dodávaného tepla, která je dána tlakem páry vystupující z turbíny. Pracovní páry vstupující do turbíny musí mít vysoké parametry tj. tlak i teplotu. Na výstupu z turbíny je obvykle pára s nízkopotenciální energií odpovídající požadavkům odběratelů. Typickými vstupními parametry páry jsou tlak $p = 3,5 - 6,3 \text{ MPa}$, a teplota $t = 450 - 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ u turbíny menšího výkonu (cca do 30 MW) a tlak až do 16 MPa, s teplotou do 560 $^{\circ}\text{C}$ u největších teplárenských protitlakových turbín. Zvyšování vstupních parametrů páry progresivně zvyšuje investiční i provozní náklady kotlů avšak výrazně zlepšuje teplárenské parametry zdroje.

Tlak páry na výstupu z turbíny je dán požadovanými parametry využívaného tepla. Optimální vstupní parametry tedy závisí na velikosti (výkonu) zařízení a na kvalitativních požadavcích odebíraného tepla. Velkou výhodou zařízení s parními turbínami je možnost spalovat v kotli libovolná paliva zahrnující plyn, mazut, tuhé komunální odpady apod. Kotle jsou často přizpůsobeny pro spalování kombinovaných paliv.

Investičně jsou tato zařízení náročná, díky požadavkům souvisejícím s vysokou teplotou a tlakem používané páry, a s poměrně komplikovaným a složitým uspořádáním kotlů a celé tepelné centrály. Parní zařízení má obvykle malý elektrický výkon vztažený na jednotku dodávaného tepla a vysoké investiční náklady na instalovaný jednotkový elektrický výkon (Kč/kWe). Pokud kotle a ostatní pomocná zařízení mají jiný hlavní účel než je výroba páry a její dodávka spotřebitelům, pak přiřazení parní turbíny do pracovního okruhu je ekonomicky velice efektivní. To je případ spalovny tuhého komunálního odpadu (případně různých jiných i nebezpečných odpadů).

U kondenzačních turbín se pára z výstupu turbíny vede do kondenzátoru. Tuto páru nelze pro kogenerační účely použít. Avšak pára může být u tohoto typu turbín ve vhodném místě expanze odebírána pro průmyslové nebo topné účely. Tato tzv. odběrová turbína může podle poptávky po teple pracovat jako kondenzační s odběrem páry nebo protitlakový, když veškerá pára (mimo nutný minimální průtok nízkotlakovou částí) je odvedena odběrem. Použití těchto turbín je účelné jen za jistých podmínek. [5]

Parní turbíny v kogeneračních tepelných zdrojích

Z hlediska výkonu lze parní turbíny používané pro teplárenské účely rozdělit do skupin:

- parní turbíny středního a velkého jednotkového výkonu
- parní turbíny malého výkonu

Turbíny o středním a velkém výkonu (elektrický výkon nad 25 MW), odběrové kondenzační i protitlakové, byly v minulosti, u nás i v zemích východní Evropy, často používané ve velkých zdrojích tepla soustav centralizovaného zásobování městských aglomerací. Největší takovéto turbíny s kogeneračním uspořádáním byly realizovány v okolí velkých měst bývalého Sovětského svazu, kde jednotkový výkon dosahoval až 300MWe. U nás se přitom využívalo možnost použití i nekvalitních, ale levných a dostupných paliv, jako je hnědé energetické uhlí.

Do podoby kogeneračních zařízení se v ČR postupně rekonstruovala část kondenzačních elektráren, aby se tak zvýšila jejich ekonomická efektivnost. Kondenzační výroba elektřiny se zde značně omezila a spotřebitelům v bližším nebo vzdálenějším okolí se dodává teplo ve formě páry nebo horké vody. Takto jsou rekonstruovány např. elektrárny Hodonín, Opatovice a Mělník. Z některých těchto zdrojů je teplo dopravováno do míst spotřeby pomocí dílkových horkovodů. Příkladem může být horkovod Mělník Praha a také dodávka tepla z elektrárny Opatovice do Pardubic a do Hradce Králové. Také u většiny ostatních kondenzačních elektráren je realizovaná dodávka tepla ve formě horké vody, ohříváné ve výměňkových stanicích pomocí páry z neregulovaných odběrů turbín. Třebaže velikost odváděného tepelného výkonu je relativně malá vzhledem k elektrickému výkonu elektrárny, jedná se o dodávku tepla o tepelných výkonech v řádu stovek megawatt. [5]

Pro moderní decentralizovanou kogenerační výrobu jsou v některých případech použitelné parní turbíny menšího výkonu. Takovéto turbíny mohou být:

- jednostupňové nebo dvoustupňové
- více stupňové

Výhody a nevýhody parních turbín v kogeneraci

Výhody:

- je použitelné libovolné palivo;
- teplo může být dodáváno v libovolné formě (horká voda, pára VT i NT);
- může být pokryt více než jeden požadavek na parametry dodávaného tepla;
- velký rozsah jednotkových výkonů;
- možnost dodávky turbíny s výkonem a parametry dle potřeb investora;
- vysoká celková účinnost kogeneračního zdroje;
- velká životnost.

Nevýhody:

- malý poměr elektrického a tepelného výkonu;
- pomalé najíždění a změna výkonu;
- kogenerační zařízení s parní turbínou je poměrně složité s řadou pomocných provozů;
- poměrně velké požadavky na zastavěnou plochu a obestavěný objem celého kogeneračního zařízení;
- poměrně velké investiční náklady;
- obtížnější realizace úplné automatizace provozu zdroje.

Parní motor

Parní motor je objemový parní stroj sestávající z bloku motoru, válců, pístů a šoupátkového rozvodu. Pohání elektrický generátor. Parní stroj i generátor jsou umístěny na společném rámu, který je využit i pro další příslušenství motoru. Parní motor je konstruován tak, aby zabránil znečištění páry mazacím olejem.

Proti parním turbínám má parní stroj výhodu v tom, že může zpracovávat menší množství páry při větším tlakovém spádu. Navíc pro provoz parního motoru postačuje sytá pára. Toto zařízení je proto možno použít i do malých technologických procesů. Moderní parní stroje jsou řešeny tak, že jejich provoz je bezobslužný.

Soustrojí parního motoru a generátoru je možné vybavit tak, aby byl možný ostrovní provoz. V takovém případě je vhodné i jako náhradní zdroj elektrické energie.

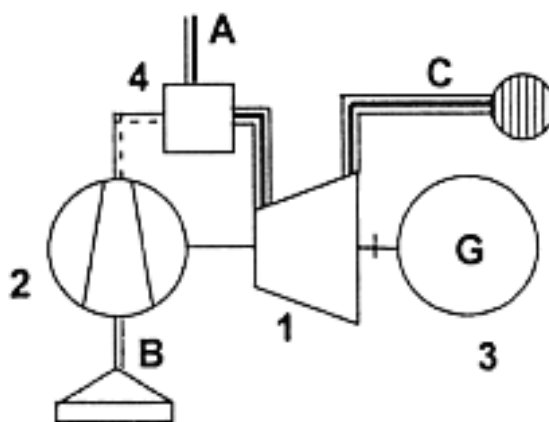
Základní zapojení parního motoru, ve spojení s generátorem elektrické energie, může být v malých teplárnách stejné jako u parní turbíny. Parní motor se také uplatní při modernizaci výtopených zařízení ve funkci točivé redukce.

Známým světovým výrobcem parních motorů je německá firma Spilling, sídlící v Hamburku. Jeden z jejích strojů je instalován i v ČR. V České republice se vývojem parních motorů pro stacionární použití v tepelných zdrojích zabývá firma Polycomp se sídlem v Poděbradech. Vyvinula tři výkonové řady: do 22 kW, do 45 kW a do 75 kW. Na vývoji ve směru většího jednotkového výkonu firma dále pracuje. [5]

5.2 Kogenerace se spalovacími turbínami

Princip práce spalovací turbíny

Spalovací turbína s jednoduchým otevřeným oběhem se skládá z kompresoru, spalovací komory, plynové turbíny, elektrického generátoru a pomocných zařízení. Schéma zapojení těchto komponent je nakresleno na obrázku 6. Kompresor nasává vzduch z atmosféry a stlačuje jej na požadovaný tlak. Stlačený vzduch je veden do spalovací komory, kde se v jeho proudu při stálém tlaku spaluje palivo. Tím vzniknou spaliny o vysoké teplotě a tlaku, které pak expandují v plynové turbíně. Po průchodu turbínou, již s nízkou teplotou, jsou odváděny do atmosféry. Plynová turbína pohání přímo kompresor. Přebytek výkonu je použit pro pohon elektrického generátoru.



obr. 6: Schéma uspořádání spalovací turbíny [5]

1 – turbína, 2 – kompresor, 3 – elektrický generátor, 4 – spalovací komora, A – přívod paliva, B – přívod vzduchu, C – odvod spalin

Spalovací turbíny, které jsou v současné době na světovém trhu, jsou produktem dlouhodobého vývoje několika světových výrobců. Výsledkem tohoto vývoje jsou kompaktní spolehlivé stroje s vysokou účinností.

V současné době se používají spalovací turbíny dvou odlišných koncepcí:

- spalovací turbíny průmyslového typu
- spalovací turbíny odvozené z leteckých proudových motorů.

Spalovací turbíny průmyslového typu jsou charakterizované robustní konstrukcí. Vycházejí původně ze zkušeností výrobců parních turbín. Jsou konstruovány obvykle jako jednohřídelové. Najdeme je v celém rozsahu vyráběných jednotek, od zařízení o výkonu řádově jednotek megawattů až po větší turbíny s výkonem řádu stovek megawatt. Komprese u nejmenších výkonových typů se provádějí s radiálními stupni u větších výkonů jsou zpravidla axiální.

Spalovací turbíny druhého typu jsou odvozeny z leteckých proudových motorů doplněných o výkonovou plynovou turbínu, napojenou na elektrický generátor. Konstrukce je odlehčena a využívá dlouholetých zkušeností výrobců leteckých motorů. Bývají dvou a někdy i tříhřídelové.

Spalovací turbíny jsou k dispozici ve výkonovém rozsahu 250 kW až 300 MW. Zařízení o výkonu pod 3 MW se příliš neuplatňuje z ekonomických důvodů, protože mají poměrně nízkou účinnost a vyšší měrnou investiční cenu. [5]

Kogenerační způsoby zapojení spalovacích turbín

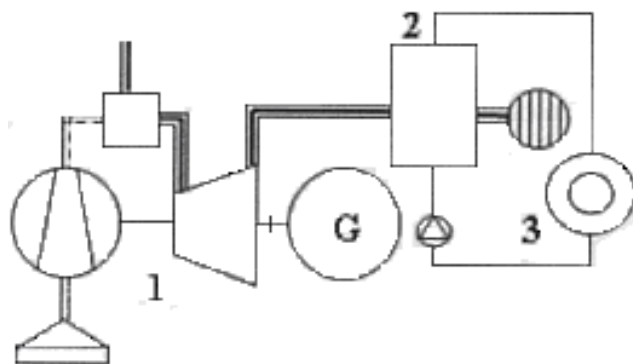
Spalovací turbíny jsou v poslední době nejrozšířenějšími pohonnými motory nově budovaných kogeneračních zařízení výkonového rozsahu 5 až 100 MW. Spalovací turbíny se mnohem lépe instalují a uvádí do provozu, než parní zařízení s vysokotlakovými kotli a turbínami. Vyžadují také podstatně menší zastavěnou plochu, mají menší hmotnost a nižší investiční náklady.

Teplota spalin na výstupu z turbíny bývá cca 450 až 550 °C, což dává předpoklady pro dodávku i vysokopotencionálního tepla (horká voda i pára). Spalování ve spalovací komoře probíhá za poměrně velkého přebytku vzduchu. Spaliny tak obsahují dostatek kyslíku, který umožňuje přívod dalšího paliva. Toto tzv. přídavné spalování (přítápění) dovoluje zvýšit teplotu spalin na hodnotu i vyšší než 1000 °C. Poměr elektrického a tepelného výkonu se tím však snižuje, takže takový provoz je přijatelný jen pro účely pokrývání špiček potřeby tepla. Pokud je požadována dodávka tepla i tehdy, když spalovací turbína není v provozu, vybavuje se kotel vzduchovými ventilátory a zvláštními hořáky. Na druhé straně je někdy výhodné, aby spalovací turbína mohla být provozována ve špičkách potřeby elektrické energie bez dodávky tepla. Pro tento účel bývá instalován zvláštní komín na výstupu spalin za spalovací turbínou, umožňující obtok spalinového kotle. [5]

Spaliny na výstupu ze spalovací turbíny mohou být využívány pro následující účely:

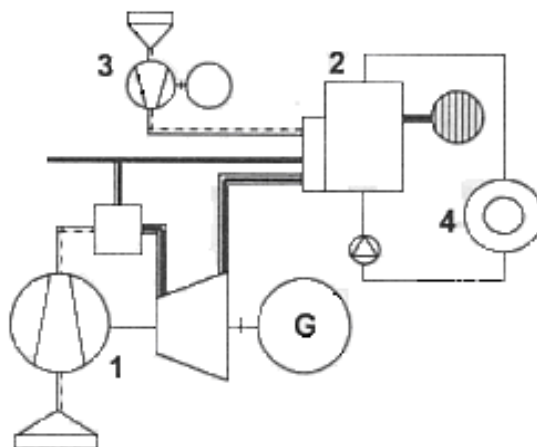
- Přímé spalování a sušení. Spaliny o vysoké teplotě je možno využít v procesech umožňujících přímý kontakt se spalinami. Pro přenos tepla nejsou nutná další média (pára, voda atd.), která by zmenšovala teplotní rozdíly a tedy i účinnost přenosu tepla.
- Produkce středotlaké a nízkotlaké páry (obvykle 0,9 až 1,8 MPa) k vytápění a pro technologické účely.
- Výroba teplé nebo horké vody.
- Výroba vysokotlaké páry pro technologické účely nebo pro pohon parní turbíny.

Základní příklady kogeneračního zapojení spalovacích turbín jsou patrné na obr. 7 a obr. 8. Kotle na odpadní teplo mohou být teplovodní, horkovodní nebo parní.



obr. 7: Princip kogeneračního zapojení spalovací turbíny [5]

1 – spalovací turbína, 2 – kotel na odpadní teplo, 3 – spotřebič tepla



obr. 8: Kogenerační zapojení spalovací turbíny s přitápěním [5]

1 – spalovací turbína, 2 – kotel na odpadní teplo s přitápěním, 3 – ventilátor pro přídavný vzduch, 4 – spotřebič tepla

Provedení tepláren se spalovacími turbínami

Při návrhu teplárny se spalovacími turbínami je nutno respektovat požadavek spolehlivosti dodávky tepla během topného období. Teplárna musí zabezpečovat dodávku tepla pro vytápění při výpadku největší instalované jednotky ve výši potřeby tepla při průměrné venkovní teplotě nejméně jednoho měsíce v roce a rovněž musí pokrývat nutné technologické potřeby. Jedná-li se o samostatný tepelný zdroj, lze tento požadavek splnit:

- doplněním tepelného zdroje dvěma až třemi klasickými kotelními jednotkami na zemní plyn;
- instalací více kogeneračních jednotek se spalovacími turbínami a kotli na odpadní teplo s přitápěním.

U malých teplárenských zdrojů se volí obvykle první z uvedených možností, vzhledem k tomu, že měrné investiční náklady malých spalovacích turbín velmi rychle rostou při zmenšování jmenovitého výkonu a současně se výrazně snižuje jejich účinnost.

Základními technologickými bloky teplárny se spalovacími turbínami jsou:

- vlastní turbosoustrojí na základovém rámu včetně elektrického generátoru a budiče (na stavbu je dopravováno v kompletním smontovaném stavu);
- blok pomocných zařízení (olejové hospodářství, čerpadla);
- blok chlazení (chlazení oleje popř. generátoru) a to nejčastěji v provedení se vzduchovým chladičem;
- blok sacího traktu obsahující žaluzie, filtry, tlumiče hluku;
- blok výstupního traktu (výstupní spalínové potrubí, obtok spalín přímo do atmosféry, uzavírací klapky, tlumič hluku);
- blok základního silnoproudého zařízení (vývod elektrického výkonu, tyristorový regulace, spouštěcí zařízení);
- kotel na odpadní teplo vč. komína;
- plynové kotle vč. hořáku a komínu;
- zařízení úpravy napájecí a doplňovací vody;
- systém řízení a regulace vč. dozorny s centrálním počítačem;
- plynová regulační stanice;
- vnější elektrotechnické zařízení (transformátor, napojení na rozvodnou síť).

Soustrojí spalovací turbíny se umísťují nejčastěji do lehkého přenosného krytu s ventilací a akustickou ochrannou. Kotle na odpadní teplo bývají ve venkovním nebo polovenkovním provedení. Pokud jsou spalovací turbíny instalovány v budově, pak na základním podlaží bez podsklepení a s co nejjednodušší stavební konstrukcí. [5]

Mikroturbíny

Do nedávné doby ekonomické analýzy ukazovaly, že spalovací turbíny o výkonu menším než 1 MW jsou neekonomické. Ukazuje se však, že v současnosti technologický vývoj tuto bariéru překonal. Výrobci vyvíjejí menší a menší stroje a nyní již jsou na světě konkurenceschopné mikroturbíny o výkonu dokonce jen 25 kW. Mikro turbíny mohou být navrženy v celém rozsahu elektrického výkonu od 25 kW až po 250 kW. Jsou to velmi kompaktní malé vysokootáčkové stroje obsahující kompresor, spalovací komoru, regenerační výměník, turbínu a generátor. Všechny jsou jednohřídelové a mají převod výkonu do sítě pomocí frekvenčního měniče. Mikroturbíny mají pouze jednu rotační část, užívají vzduchem chlazená ložiska a nepotřebují mazací olej. Jako palivo používají především zemní plyn, mohou však pracovat i s naftou, benzínem, nebo jinými vysoce výhřevnými čistými palivy. Probíhá i vývoj možného použití bioplynu.

Pro účely kogenerace se mikroturbíny zapojují obdobným způsobem jako malé spalovací turbíny. Dodávku tepla je vhodné uskutečnit pomocí teplé nebo horké vody. Mikroturbíny jsou menší než konveční spalovací motory a nižší jsou rovněž jejich investiční náklady a náklady na údržbu. Mají také

environmentální výhody, včetně nižších emisí NO_x v rozpětí 10 až 25 ppm i nižší (při O_2 15% ekvivalentu).

Mikroturbíny mohou být použity jako decentralizované zdroje elektřiny pro výrobce i spotřebitele vč. Průmyslu a obchodu a v budoucnu pravděpodobně i pro pokrývání potřeby elektřiny a tepla v bytové a komunální sféře. Svě místo nacházejí také jako nouzové zdroje elektřiny. [5]

Výhody a nevýhody spalovacích turbín v kogeneraci

Výhody

- Vysoká spolehlivost dovolující dlouhý provoz bez nutnosti provozních odstávek
- Dostupnost vysokopotencionálního tepla, dovolujícího dodávku tepla ve všech požadovaných formách
- Rychlé najíždění a změna výkonu
- Možnost každodenního odstavování
- Při daném výkonu malá hmotnost a rozměry
- Malá spotřeba vody
- Nízké měrné investiční náklady
- Kompaktnost provedení a malé požadavky na zastavěnou plochu a obestavěný prostor
- Krátká doba výstavby zařízení
- Dobrá možnost automatizace provozu vedoucí až k bezobslužnému provozu
- Malé požadavky na chladicí nebo přídavnou vodu

Nevýhody

- Vyžaduje relativně kvalitní a čisté palivo(nejlépe zemní plyn nebo lehká kapalná paliva)
- V případě spalování plynu je požadován jeho vysoký tlak nebo výstavba zvláštní plynové kompresorové stanice
- Vysoká hluková hladina, zejména zvuku o vysokém kmitočtu
- Horší účinnost při nízkých zatíženích a vyšších teplotách okolí
- Nižší účinnost ve srovnání se spalovacími motory
- Při malých jednotkových výkonech nižší účinnost a větší měrné investiční náklady

5.3 Paroplynová zařízení

Princip paroplynových tepelných zdrojů

Stále rostoucí požadavky na úspory primárních energetických zdrojů a na ochranu životního prostředí se projevují i ve změnách koncepce tepelných energetických zdrojů. S výhodou je možno spojit v jeden celek spalovací turbínu a pracovní okruh parní turbíny. Vznikne tzv. paroplynové zařízení,

spojující výhody obou dílčích prvků. Toto zařízení je možno použít jak pro samostatnou výrobu elektřiny, tak v kogeneračním zapojení. Paroplynové zařízení použité v elektrárně se vyznačuje neobyčejnou provozní pružností a nejvyšší účinností (dnes účinnost nejdokonalejších bloků přesáhla 60%). Obdobné vlastnosti mají také kogenerační bloky využívající tento princip činnosti. To je důvodem k velkému rozšíření těchto jednotek všude ve světě. V současné době velká část rekonstruovaných nebo nově stavěných plynových tepláren je vybavena právě paroplynovým zařízením.

Nejčastější uspořádání kogeneračního paroplynového tepelného zdroje sestává ze soustrojí spalovací turbíny nebo spalovacího pístového motoru, z parního kotle využívajícího jejich odpadní teplo k výrobě páry a z parní turbíny s příslušenstvím. Pára vyrobená v kotli na odpadní teplo spalovací turbíny se používá k pohonu parní turbíny. V paroplynovém zdroji nacházejí uplatnění i plynové spalovací motory velkého výkonu, jejich výfukové plyny se mohou použít k výrobě páry pro pohon parní turbíny.

Parní turbíny užívané v paroplynových kogeneračních zařízeních jsou jedno nebo dvojtakového provedení, protitlakové, odběrové protitlakové nebo odběrové kondenzační obvykle bez regeneračního ohřevu napájecí vody. Teplo pro spotřebitele může být dodáváno z parního okruhu v libovolné formě. [5]

Výhodami paroplynových kogeneračních zdrojů ve srovnání se zdroji s parními turbínami jsou:

- Výrazně zvýšená výroba elektrické energie
- Větší provozní pružnost
- Menší požadavky na zastavěnou plochu a prostor
- Nižší celkové měrné investiční náklady
- Snadnější optimalizace provozních režimů v dodávce tepla a elektrické energie

Při srovnání s kogeneračními zdroji se spalovacími turbínami:

- Vyšší výroba elektrické energie
- Snadnější optimalizace provozu

5.4 Speciální kogenerační zařízení

Kogenerační zařízení využívající palivové články

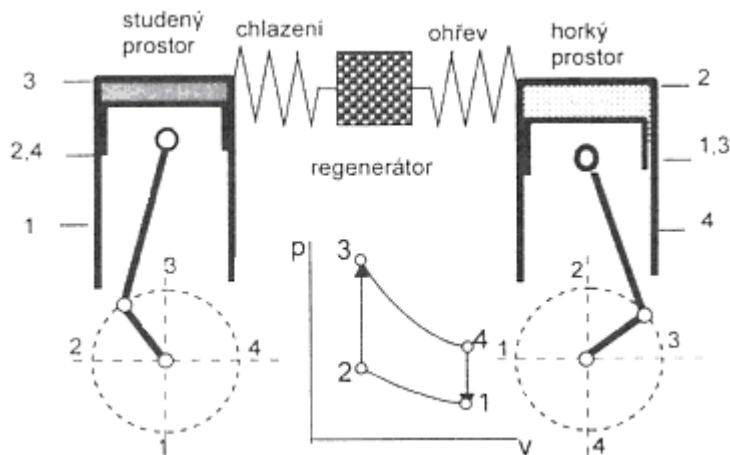
Palivové články jsou elektrochemické zdroje, které přeměňují energii obsaženou v palivu přímo na energii elektrickou. Zdrojem energie je nejčastěji vodík, který spolu s kyslíkem (ze vzduchu) může exotermním procesem vyrábět elektrickou energii prostřednictvím elektrolytu za vzniku vody nebo vodní páry.

Na porézní anodě pokryté vrstvou katalyzátoru dochází ke štěpení vodíku na protony a elektrony. Protony procházejí elektrolytem ke katodě rovněž pokryté katalyzátorem a reagují tam s adsorbovanými kyslíkovými atomy na vodní páru, zatímco elektrony protékají elektricky vodivou anodou a uzavřeným okruhem jako elektrický proud.

Palivem palivových článků by mohl být nejlépe přímo vodík. V současné době je však možno počítat jen se zemním plynem, který je tvořen převážně metanem. Zemní plyn musí být však před použitím v palivovém článku rozložen na vodík a oxidy uhlíku (CO_2 a CO). To se děje v procesní jednotce (v konvertoru), v níž metan reaguje s vodní párou (parní performing). Vedle konvertoru a palivového článku je systém doplněn elektrickým investorem pro přeměnu stejnosměrného proudu na střídavý. [5]

Stirlingův motor v kogeneraci

Stirlingův motor má velmi dlouhou historii vývoje. Skotský inženýr Robert Stirling patentoval tento motor už v roce 1816. V následujících desetiletích se jeho teplovzdušný motor úspěšně uplatnil v řadě odvětvích. Teprve koncem 19. století jej rozvoj spalovacích zážehových a vznětových motorů odsunul do pozadí a téměř k zapomenutí. V posledních třiceti letech však došlo k jeho znovu zrození. Představy o uplatnění zdokonalených verzí Stirlingova motoru v mobilních aplikacích se nenaplnily, avšak ukázalo se, že tento typ motoru může najít své místo ve stacionárním provedení a to zejména při kogenerační výrobě tepla a elektřiny. O principu práce Stirlingova motoru je možno si učinit představu na základě obr.9. [5]



obr. 9 Princip práce Stirlingova motor [5]

Výhody

Moderní Stirlingův motor se vyznačuje dobrou účinností, spolehlivostí, tichým chodem a nižšími emisemi škodlivých plynů. Hlavní výhodou je skutečnost, že tento motor může pracovat s nejrůznějšími zdroji tepla počínaje sluneční energií a konče libovolným fosilním palivem a biomasou. Lze využít i odpadního tepla technologických procesů. Motor má nulovou. Motor má nulovou spotřebu oleje, výrazně

nižší servisní náklady, dané dlouhými intervaly mezi údržbovými odstávkami(až 10000 hodin) a dlouhou životností.

Nevýhody

Složitost zařízení, vyšší měrná hmotnost na jednotku výkonu, technická náročnost těsnění tlakového prostoru válců a vyšší cena dána dosud malou sériovostí výroby a náročnou montáží, nutností použít speciálních materiálů a technologických postupů.

5.5 Kogenerace se spalovacími motory

Spalovací motory pro kogenerační jednotky

Spalovací motory, používané v kogeneraci, jsou pístové motory s vnitřním spalováním, odvozené od klasických mobilních spalovacích motorů(vozidlových, trakčních a lodních).

Ty se podle způsobu zapálení směsi vzduchu a paliva ve válci rozdělují do dvou skupin:

- Vznětové motory
- Zážehové motory

U vznětových motorů (označovaných u nás poněkud nepřesně jako dieselovy nebo naftové) dochází k zapálení paliva ve válci samovznícením při vstřiku do horkého stlačeného vzduchu. Účinnost těchto motorů na hřídeli je v rozpětí 35% až 45% a jejich jednotkový výkon může dosáhnout až 25 MW. Moderní vznětové motory mají vysoký kompresní poměr a používají zpožděné zapalování a hoření aby dosáhly snížení emisí NO_x , přičemž zůstává zachován vysoký výkon a účinnost. Tyto požadavky vynucují dokonalejší provedení vstřiku paliva a řídicího systému motoru.

Zážehové motory se vyznačují zapalováním směsi paliv a vzduchu elektrickou jiskrou. Mají spojkovou účinnost nižší než je účinnost vznětových motorů a to mezi 27% až 43%, a také jejich výkonové rozpětí je menší. Nové zážehové motory s výkonem nad 3MW užívají předkomůrku, v níž má směs stechiometrické složení. Motory s předkomůrkou mají účinnost až 43%, obdobně jako velké vznětové motory.

Mají-li být spalovací motory využity pro kogeneraci, je nezbytné je rekonstruovat pro spalování zemního plynu. Tuto úpravu je možné provést jak u vznětových, tak u zážehových motorů. Rekonstrukce se týká především palivového systému a spalovacího prostoru. V palivovém systému se připravuje směs plynu a vzduchu požadovaného složení, která se ve válci zapaluje obvykle elektrickou jiskrou. V některých případech (u motorů velkého výkonu) se používá dvoupalivový systém, kdy je k dosažení zapálení s plynem vstřikováno malé množství motorové nafty (kolem 5% celkového tepelného vstupu).

Provozem spalovacích motorů vznikají nevyvážené síly a tyto motory proto potřebují speciálně navržené uložení na základ absorbující vzniklé vibrace. Problémem je také hluk, zejména nízkofrekvenční složky, které mají nepříjemný dopad na lidský sluch. Motory je proto nutné vybavit kvalitní hlukovou izolací.

Spalovací motory obsahují mnoho součástí s posuvným pohybem v oblasti vysokých teplot. Mazání jejich třecích ploch je obtížné, proto se tyto součásti opotřebovávají mnohem více, než u čistě rotačních strojů. Důsledkem jsou vyšší požadavky na údržbu a častější odstavování z provozu. Menší frekvenci údržby vyžadují stroje pracující při nižších otáčkách.

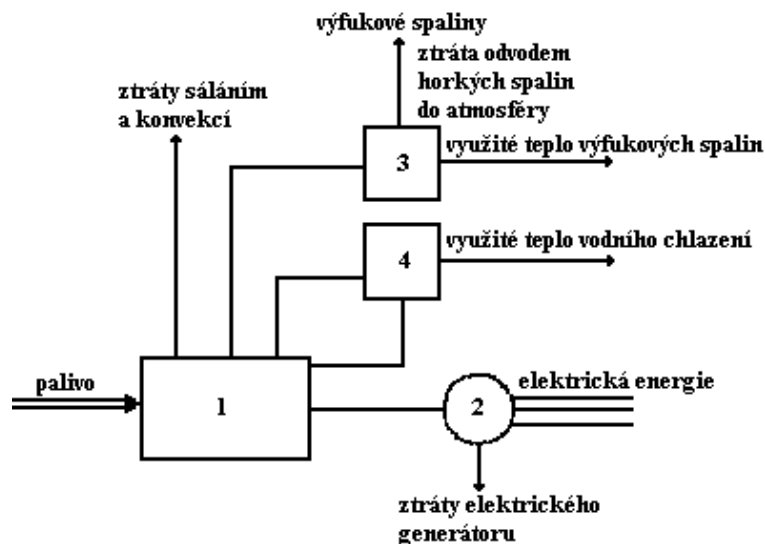
Plynové spalovací motory pracují ve dvou režimech přebytku vzduchu:

- S množstvím vzduchu blízkém stechiometrickým požadavkům na spalování
- S velkým přebytkem vzduchu (lean burn)

Maximálního výkonu a účinnosti motory dosahují při spalování v oblasti mírného přebytku vzduchu. Přitom však produkují poměrně velké množství NO_x . Použije-li se velký přebytek vzduchu emise NO_x se podstatně sníží. Takovýto provoz má ale za následek zvýšení obsahu CO a nespálených uhlovodíků ve spalinách a někdy vede ke spalovací nestabilitě. [3]

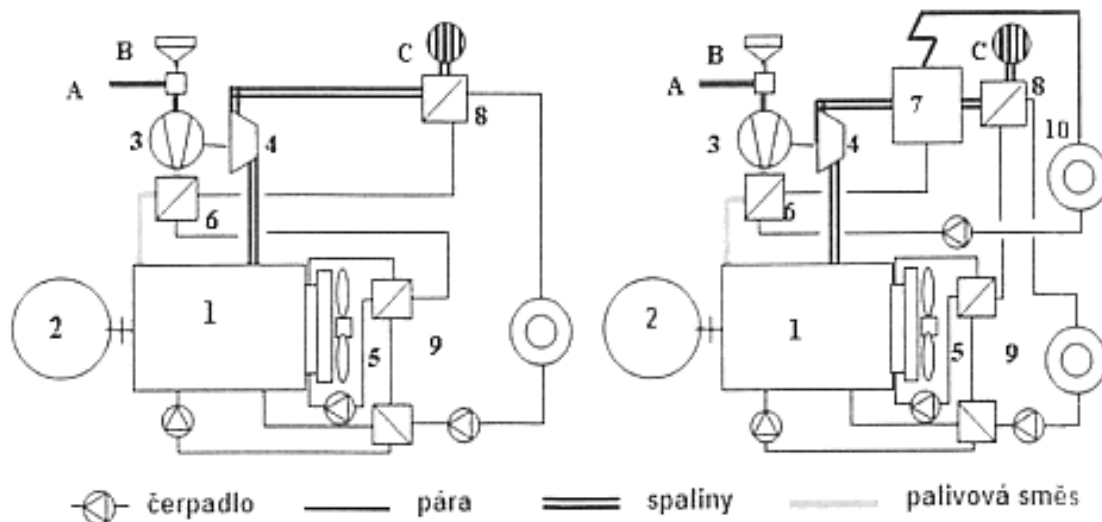
Kogenerační jednotky se spalovacími motory

Spalovací motor je tepelný stroj velmi vhodný k teplárenskému využití. Motor pohánějící elektrický generátor produkuje současně odpadní teplo. Jedná se o teplo chlazení motoru (blok válců a hlava motoru), chlazení mazacího oleje a o teplo výfukových plynů. Chlazení oleje je prováděno pomocí vodního chladicího okruhu, z něhož je teplo odváděno topnou vodou. Ohřev této vody může být proveden nanejvýš na teplotu kolem 80 °C. Využívá-li se ve zvláštním výměníku chladící teplo bloku motoru a hlav válců, může výstupní teplota topné vody dosahovat i 100 až 110 °C, jestliže je primární okruh proveden jako tlakový. Vzhledem k tlakovým poměrům v primárním chladicím okruhu motoru je ovšem výhodnější, je-li požadováno ohřátí topné vody jen na 90 až 100 °C. VE výměníku využívajícím tepla výfukových plynů, jejich teplota je nejčastěji v rozmezí 400 až 540 °C, je možné ohřát tlakovou vodu na teploty vyšší než 110 °C (omezení je dáno tlakem v okruhu ohřívání vody) nebo vyrábět v něm páru. Principální uspořádání kogenerační jednotky se spalovacím motorem a toky energií jsou nakresleny na obr.10.



obr. 10 Toky energií u kogenerační jednotky se spalovacím motorem v základním zapojení
 1 spalovací motor; 2 elektrický generátor; 3 výměník tepla spaliny/topná voda;
 4 výměník tepla chladící voda/topná voda

Nejvýhodnějším využitím odpadního tepla je ohřev topné vody na teplotu kolem 90 °C. Výroba páry představuje jisté technické obtíže a může být efektivní jen za předpokladu hybridní spotřeby tepla, tj. současné potřeby tepla v páře a v teplé vodě. V takovém případě může být teplo chlazení oleje, bloku a hlav válců a chlazení vzduchu za turbodmychadlem použito pro ohřev topné vody nebo pro přehřev napájecí vody parních kotlů a teplo výfukových spalin pro výrobu páry. Tlak páry by neměl být příliš velký, aby se mohlo dosáhnout dostatečného vychlazení spalin. U zařízení větších jednotkových výkonů je možno dochlazování spalin provést přídavným výměníkem ohřívajícím teplou vodu. Výroba páry, zejména v případě menších kogeneračních jednotek, může být nejlépe uskutečněna tak, jak je nakresleno na obr. 11. [3]



a) dodávka tepla ve formě teplé
nebo horké vody

b) dodávka tepla ve formě páry
a horké vody

obr. 11 Základní zapojení spalovacích motorů pro kogenerační účely [5]

1 spalovací motor; 2 elektrický generátor; 3 kompresor přepřlňování turbodmychadla; 4 turbína
turbodmychadla; 5 okruh chlazení oleje a bloku válců motoru s ohříváky topné vody; 6 chladič stlačeného vzduchu;
7 parní kotel; 8 spalínový ohřívák topné vody; 9 okruh topné vody; 10 spotřebič páry

Emise škodlivých látek

Při spalování zemního plynu v motorech kogeneračních jednotek vzniká jednak neškodná vodní pára, dále oxid uhličitý (lokálně neškodný) a několik látek škodících životnímu prostředí. Těmito látkami jsou zejména oxid uhelnatý (CO), oxidy dusíku (NO a NO₂) a nespálené uhlovodíky (HC). Oxidy dusíku vznikají v důsledku vysokých teplot při spalování. Oxid uhelnatý vzniká nedostatečnou oxidací a příliš vysokým ochlazením plamene. Emise nespálených uhlovodíků je důsledkem existence mrtvých koutů (např. štěrbin mezi válcem, pístem a pístními kroužky) a studených zón, jimiž neprojde fronta plamene.

Omezení všech těchto emisí je vážným problémem všech energetických zařízení. I když z pohledu teritoria státu znamená použití kogenerace výrazné snížení emisí, nelze přehlédnout, že z lokálního pohledu životní prostředí zatěžují. Pro jejich omezení se používají primární a sekundární opatření.

K primárním opatřením patří konstrukční úpravy motorů (optimalizace pracovního prostoru válců, odstranění mrtvých koutů apod.) a provozní opatření (snížení zatížení motoru, zvýšení přebytku vzduchu, optimální nastavení zážehu apod.). Jednotlivá primární opatření však většinou působí na tvorbu emisí různě podle druhu emitující látky. Je proto potřeba je kombinovat a volit optimální kompromis. [3]

Dnes se používá nejčastěji kombinace těchto opatření:

- Koncepce spalování chudé směsi
- Přizpůsobení bodu zážehu
- Snížení zatížení motoru (vhodné také pro zvýšení životnosti)
- Vhodná konstrukční opatření

Motory využívající pokročilé technologie spalování nové generace jsou schopny bez katalyzátoru, pomocí výše uvedených opatření splnit požadované emisní limity.

K sekundárním opatřením patří zařazení katalyzátorů. U menších zařízení se setkáváme s jednocestnými oxidačními katalyzátory. Větší a dražší jednotky používají trojcestný regulovaný oxidační katalyzátor, čímž se snižuje obsah NO_x , CO i HC.

Zařízení velkého výkonu také používají, podobně jako velké elektrárenské bloky, selektivní katalytickou redukci oxidů dusíku pomocí čpavku (NH_3). Čpavek se přidává do proudu spalín buď jako plyn, nebo ve formě vodního roztoku. Dávkování se automaticky řídí podle obsahu NO_x ve spalínách. Obsah NO_x se tímto způsobem může snížit i o více než 80%. Pro snížení ostatních emisí se toto zařízení doplňuje o předřazený neřízený oxidační katalyzátor.

Ekologickým opatřením je také ochrana proti hluku. Protihlukové kryty mohou být provedeny samostatně pro každou z kogeneračních jednotek, po případě pro více jednotek. Zejména u větších zařízení se obvykle provádí hluková izolace celé strojovny. Pro omezení hluku je dále důležitý tlumič hluku umístěný ve výfukovém potrubí před vstupem do komína, dokonale odhluční přívodu a odvodu ventilačního vzduchu, protivibrační oddělení připojovaných potrubí a pružné uložení jednotek na základ.

[3]

6 Návrh KJ pro konkrétní zdroj bioplynu

6.1 Skládka TKO jako zdroj bioplynu

Zdrojem bioplynu, který je možné využít pro kogenerační výrobu elektřiny a tepla v kogenerační jednotce (KJ), je skládka tuhého komunálního odpadu (TKO), spadající pod okresní město. Její parametry jsou následující:

- Plocha skládky: 2,3 ha (23 000 m²)
- Objem skládky (kapacita): 280 000 m³
- Zahájení provozu skládky: únor 2006
- Předpokládaná doba provozu skládky: podzim 2010

Jedná se o řízenou skládku kategorie S-00, určenou pro bezpečné ukládání komunálních odpadů a odpadů kategorie „ostatní“. Podloží skládky je tvořeno jílovitou vrstvou o tloušťce cca 1 m. Na této vrstvě je položena izolace z PEHD fólie, která je seshora kryta geotextilií. Pokládka této fólie je zobrazena na obr. 12. Následuje vrstva štěrku frakce do 32 mm o tloušťce 25 cm, která je vrstvou drenážní, v níž jsou zabudovány sběrné drény. Tyto drény ústí do akumulární jímky o objemu 200 m³, kde se shromažďují průsakové vody ze skládky. Na štěrkové drenážní vrstvě je položena opět geotextilie. Ochranu drenážní vrstvy a všech izolačních vrstev zajišťuje vrstva starých pneumatik.



obr. 12 Pokládka izolační PEHD fólie na dno skládky

Na skládce ukládaný odpad je po vrstvách hutněn. Výjimku tvoří první (nejspodnější) vrstva odpadu, která se takřka nezhuťuje za účelem pojmutí srážkové vody. Každá zhutněná vrstva odpadu o tloušťce cca 1 m je následně překryta vrstvou tzv. technologického materiálu o tloušťce cca 10 cm. Tento materiál však nesmí tvořit více než 25 % objemu na skládce ukládaných odpadů.

Z uskutečněného plynometrického průzkumu, spočívajícího ve vyhodnocení tvorby plynů v tělese skládky, vyplynulo následující:

- Průměrná koncentrace metanu ve skládkovém plynu je 43 %
- Odhadovaná denní produkce skládkového plynu je 660 m³
- Odhadovaná hodinová produkce skládkového plynu je 27,5 m³

Jedná se tedy o skládku TKO s produkcí bioplynu o vyšším obsahu metanu, čímž se skládka řadí do kategorie III.

Do konce roku 2010 je naplánováno provedení odplynění skládky. Na základě zmíněného plynometrického průzkumu se počítá s vybudováním cca šesti vrtů pro jímání skládkového plynu, který bude sběrným potrubím odváděn do čerpací stanice vybavené dmýchadlem s filtrem. Tam bude zároveň probíhat měření kvality a množství bioplynu. Odtamtud bude bioplyn veden do strojovny s kogenerační jednotkou, kde se využije na výrobu elektrické energie a tepla. Předpokládá se, že vyrobené teplo bude použito pro vytápění provozních budov v areálu skládky a pro přípravu teplé užitkové vody (TUV) a vyrobená elektrická energie bude dodávána přes distribuční transformátorovou stanici do veřejné distribuční sítě. Bude tedy vykupována provozovatelem této sítě.

6.2 Vlastní návrh KJ – technické řešení

Pro vlastní návrh jsem zanedbával kolísání hodinové produkce skládkového plynu, kolísání koncentrace metanu ve skládkovém plynu a vycházím z odhadovaných průměrných hodnot.

Dle zadaných parametrů nejlépe vyhovuje kogenerační jednotka v kontejnerovém provedení MOBIL MGM 70 od společnosti Motorgas, jenž je zobrazena na obr. 13. Jedná se o jednotku s jmenovitými hodnotami elektrického výkonu 64 kW, tepelného výkonu 100 kW a spotřebou plynu 30 m³/h. Další parametry se nacházejí v příloze 1.

Výhodou kontejnerového provedení jsou téměř nulové investiční náklady na stavební úpravu plochy pro umístění kogenerační jednotky. Postačí pouze základ o dostatečné únosnosti o rozměrech 5500 x 2250 mm a zpevněný povrch pro umístění chladiče nouzového chlazení.



obr.13 kogenerační jednotka v kontejnerovém provedení

Pořizovací cena základního provedení modelu MOBIL MGM 70 s nouzovým chlazením činí 2 538 000 Kč bez DPH.

Podle zvolené kogenerační jednotky lze zjednodušeně vypočítat průměrné množství denní vyrobené elektrické energie, za předpokladu, že výkon kogenerační jednotky bude 59 kW elektrické energie za hodinu (jedná se odhadovaný výkon, protože produkce skládkového plynu se mění stejně jako jeho výhřevnost, od čehož se vyvíjí aktuální výkon), vynásobením výkonu a počtu hodin:

$$59\text{ kW} \times 24\text{ h} = 1416\text{ kWh}$$

Z důvodu servisních odstávek nelze počítat s celoroční nepřetržitým provozem, ale pouze s tím, že kogenerační jednotka bude v provozu jen 341 dní. Vynásobením množství denní vyrobené elektrické energie a provozních dní dostaneme průměrnou roční produkci elektrické energie:

$$1416\text{ kWh} \times 341\text{ dní} = 482856\text{ kWh}$$

6.3 Vlastní návrh KJ – ekonomické zhodnocení

V následující tab.3 jsou uvedeny státem garantované výkupní ceny elektrické energie a zelené bonusy pro spalování různých druhů bioplynů. Zelený bonus může získat výrobce elektřiny z obnovitelných zdrojů, jenž generovanou elektřinu sám využívá pro svou vlastní potřebu a případné přebytky dodává do sítě. Zelený bonus je částka, kterou stát přispívá za každou vyrobenou a zároveň spotřebovanou MWh elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Pokud si výrobce elektřiny vybere podporu formou zelených bonusů, musí si najít sám svého odběratele elektrické energie. Jestliže však výrobce elektřiny z obnovitelných zdrojů veškerou svou produkci dodává do distribuční sítě, je provozovatel regionální distribuční sítě povinen odkoupit tuto elektřinu za státem garantovanou výkupní cenu.

tab. 3 Výkupní ceny pro spalování bioplynu, skládkového plynu, kalového plynu a důlního plynu[7]

Druh obnovitelného zdroje	Výkupní ceny elektřiny dodané do sítě v Kč/MWh	Zelené bonusy v Kč/MWh
Spalování bioplynu v bioplynových stanicích kategorie AF1	4120	3150
Spalování bioplynu v bioplynových stanicích kategorie AF2	3550	2580
Spalování skládkového plynu a kalového plynu z ČOV po 1. lednu 2006	2470	1500
Spalování skládkového plynu a kalového plynu z ČOV od 1. ledna 2004 do 31. prosince 2005	2790	1820
Spalování skládkového plynu a kalového plynu z ČOV před 1. lednem 2004	2900	1930
Spalování důlního plynu z uzavřených dolů	2470	1500

Výkupní cena elektrické energie získané spalováním skládkového plynu činí pro rok 2010 2,47 Kč/kWh z čehož vypočteme předpokládaný roční výnos z prodeje elektrické energie, uveden v tab.4.

tab. 4 Předpokládaný roční výnos z prodeje elektrické energie

Výroba elektrické energie (kWh)	Sazba (Kč/kWh)	Výnos z prodeje bez DPH (Kč)	Výnos z prodeje včetně 20% DPH (Kč)
482 856	2,47	1 192 654,32	1 431 185,184

Dále je třeba zahrnout do ekonomického zhodnocení mzdové náklady pracovníka, jenž kontroluje a dohlíží na správnou funkci zařízení, servisní náklady, náklady na pravidelné revize atd.. Servis kogenerační jednotky je zajišťován výrobcem po dohodě s provozovatelem. Výrobce zajišťuje kompletní servis dle dohodnuté smlouvy a je možno volit mezi servisem prováděným na objednávku, nebo paušálním

servisem placeným za každou vyrobenou kWh. Cena paušálního servisu nabízená společností Motorgas je neměnná v čase a je pro tuto kogenerační jednotku spalující bioplyn 0,35 Kč/kWh. Roční servisní náklady placeny paušálně pro kogenerační jednotku MOBIL MGM 70 s roční výrobou 482 856 kWh činí 168 999,6 Kč.

Kontrolu správné funkce kogenerační jednotky má na starost zaměstnanec provozovatele. Každodenní kontrola netrvá déle než 1 hodinu. Mzdové náklady na hodinu práce pracovníka činí 100 Kč včetně odvodů na sociální a zdravotní pojištění. Při předpokladu, že kogenerační jednotka bude v provozu 341 dní a kontrola je každodenní vychází roční mzdové náklady 34 100 Kč při zanedbání meziročních nárůstů platů. Ze získaných hodnot můžeme stanovit přibližný roční zisk uvedený v tab. 5

tab. 5 Roční ekonomické zhodnocení

Popis	Částka bez DPH (Kč)
Výnos z prodeje elektrické energie	1 192 654,32
Servisní náklady	-168 999,60
Mzdové náklady	-34 100
Zisk z prodeje elektrické energie	989 554,72

Doba návratnosti investice

Dobu návratnosti (T_N) pořizovacích investičních nákladů na kogenerační jednotku MOBIL MGM 70 můžeme zjednodušeně určit jako podíl pořizovací ceny této kogenerační jednotky a předpokládaného ročního zisku z prodeje elektrické energie, jako:

$$T_N = \frac{2538000 \text{ Kč}}{989554,72 \text{ Kč} \cdot \text{rok}^{-1}} = 2,56 \text{ let}$$

7 Závěr

Současný stav na naší planetě si žádá neustále více elektrické energie. Stále méně se však můžeme spoléhat na zásoby fosilních paliv, které nám již brzy mohou dojít. Aby se takto nestalo je třeba hledat neustále nové alternativní zdroje a výrobní postupy. Jednou z mnoha možností je kogenerace. Předností kogenerace je především, že teplo a elektřina vznikají co možná nejbližší místa spotřeby. Navíc se využívá téměř všechno využitelné teplo, čímž se snižuje nutnost dalších zdrojů. Pro kogeneraci můžou samozřejmě sloužit i fosilní paliva, ale stále více se uplatňuje využívání alternativních paliv a to především bioplynu. Při výrobě bioplynu dochází pouze k přeměně rostlinné a živočišné hmoty na dále využitelné látky. Spalováním bioplynu se uvolňuje pouze o málo menší množství CO_2 a dalších skleníkových plynů, než které navázaly rostliny během svého života. Tudíž se jedná o téměř uzavřený cyklus. Stále více se uplatňuje recyklace a třídění odpadu, čímž dochází ke snížení množství sládkovaných biologických látek. Dnes se začínají využívat spíše aerobní nebo více anaerobní způsoby odstraňování organických materiálů. Při anaerobním způsobu zpracování zachycujeme množství uvolněné energie, kterou dále využíváme. Ale i přesto končí na skládkách značné množství těchto látek, jenž při svém rozkladu produkují bioplyn, který běžně uniká do atmosféry. Použitím kogeneračních jednotek na skládkách se tento jinak nevyužitý zdroj energie zachytí a využije pro výrobu elektrické energie a tepla. V dnešní době jsou kogenerační jednotky spolehlivé a dálkově říditelné, takže jsou schopny sledovat stav sítě a podle toho regulovat svůj výkon. Z konkrétního návrhu uvedeného v této práci je zjevné, že je tento způsob výroby elektrické energie i finančně zajímavý a to nejen díky státem zaručeným výkupním cenám, které jsou jen o něco málo vyšší než ceny pro elektřinu vyrobenou klasickými zdroji. Ale i pokud by došlo k narovnání cenových podmínek pro všechny zdroje elektřiny, stále by se jednalo o dobrý zdroj, jen doba návratnosti pořizovacích investičních nákladů by se asi zdvojnásobila, což je stále lukrativní. Navíc je třeba mít na mysli, že se jedná o obnovitelný zdroj energie, který je zároveň šetrný k životnímu prostředí.

Seznam použité literatury

- [1] Straka, F.: Bioplyn, Praha, 2006.
- [2] Schulz, H., Eder, B.: Bioplyn v praxi : teorie - projektování - stavba zařízení, Ostrava, 2004.
- [3] Tabašek, M.: Energetické využití bioplynu v kogenerační jednotce se spalovacím motorem, Ostrava, 2007.
- [4] Kapitolová, M.: Bioplynová stanice s kogenerací a následné využití bioplynu, Ostrava, 2008.
- [5] Krbek, J., Polesný, B.: Kogenerační jednotky - zřizování a provoz, Praha, 2007.
- [6] Koud'a, J. a kolektiv: Bioplynové stanice s mokřým procesem, Praha, 2008
- [7] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č.4/2009 ze dne 3. listopadu 2009, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů [online].[cit.2010-04-10] . Dostupné z: http://www.eru.cz/user_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/OZ/ER%20CR%204_2009_OZE_KVET_DZl.pdf
- [8] MOBIL MGM 70 bioplyn typový list kogenerační jednotky [online].[cit.2010-04-11]. Dostupné z: http://www.motorgas.cz/upl/produkty/1000134s1_typlist_MGM70_mobil_bio_cz.pdf
- [9] Babička, L.: Významný přínos výroby bioplynu [online].[cit.2009-10-14]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyznamny-prinos-vyroby-bioplynu>
- [10] Kučera, Z.: bioplynová stanice ano/ne *) nehodící se škrtněte [online].[cit.2009-10-27]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynova-stanice-anone-nehodici-se-skrtnete>
- [11] Karafiát, Z., Pospíšil, L., Vítěz, T.: Bioplynové stanice na „suchou“ fermentaci – šance pro energetické využití biologicky rozložitelných odpadů (BRO) [online].[cit.2009-11-08]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynove-stanice-na-suchou-fermentaci-sance-pro-energeticke-vyuziti-biologicky-rozlozitelnych-odpadu-bro>

- [12] Dohányos, M.: Anaerobní reaktor není černou skříňkou – teoretické základy anaerobní fermentace [online]. [cit. 2009-10-26]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/anaerobni-reaktor-neni-cernou-skrinkou-teoreticke-zaklady-anaerobni-fermentace>
- [13] Anaerobní technologie [online]. [cit. 2009-11-14]. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm
- [14] Bioplynové stanice „suchá“ anaerobní fermentace [online]. [cit. 2009-11-09]. Dostupné z: <http://www.fortexbioplyn.cz/cz/bioplynove-stanice-sucha-fermentace/>
- [15] Odděleně sbírané BRKO obsahující živočišné zbytky a potravinové odpady [online]. [cit. 2009-10-17]. Dostupné z: http://www.biosance.cz/index.php?id=oddelene_sbirane_brko
- [16] Bioplynové stanice [online]. [cit. 2009-11-05]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz/cz/aktivita/provadeni-staveb/ekologicke-stavby/biostanice/>
- [17] Biogas plant for waste recycling [online]. [cit. 2009-12-07]. Dostupné z: <http://zorg-biogas.com/biogas-plants/how-it-works>